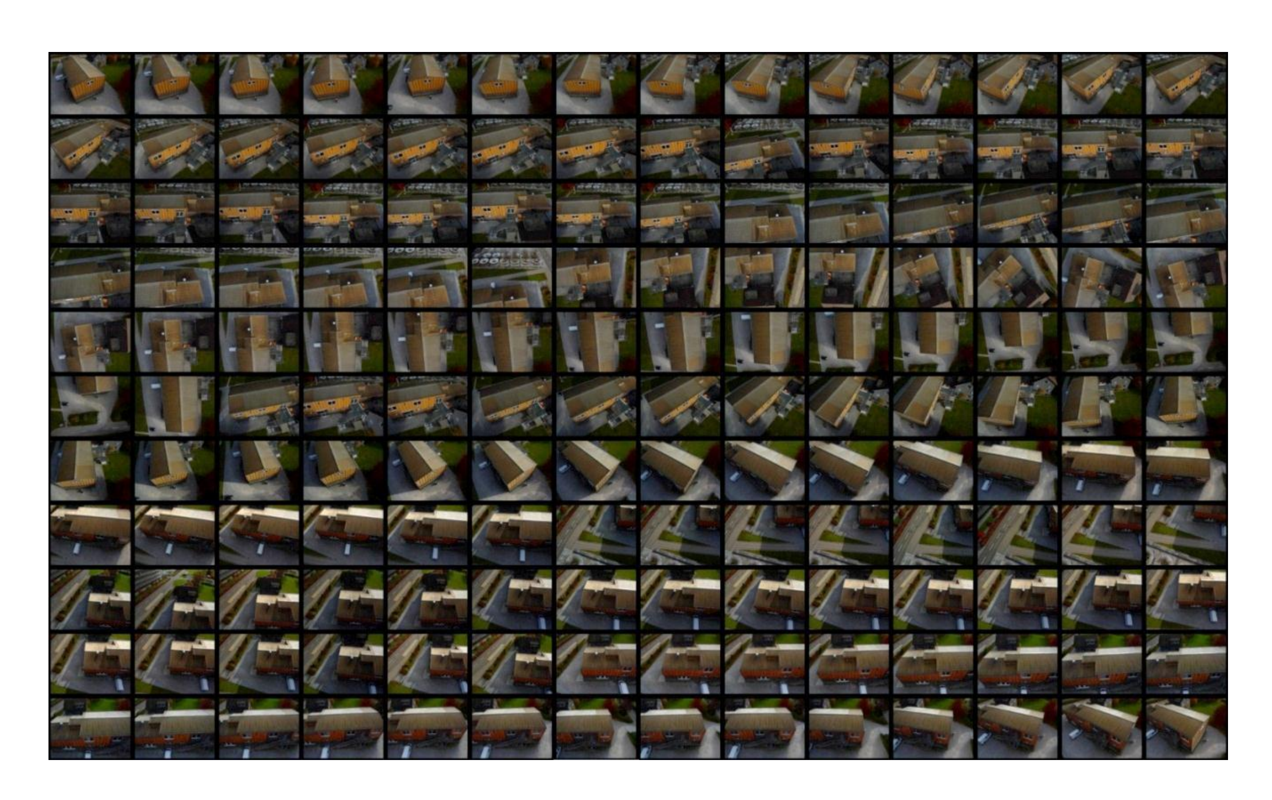




Untersuchungen zum Videomodus der Kamera auf dem Oktokopter

Masterarbeit



Verfasser

Christoph Ober

Leitung

Prof. Dr. Konrad Schindler

Betreuung

David Novák

ETH Zürich
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Geomatik und Planung MSc

D-BAUG
Professur für Photogrammetrie
HS 2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Masterarbeit am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich.

Ausgangspunkt für die Arbeit bildet die Anschaffung des UAV Oktokopter AscTec Falcon 8 mit der auf am UAV montierten Kamera Panasonic DMC LX 3 am IGP. Das Gesamtsystem soll im Hinblick auf die Verwendung zur automatischen Erstellung von 3D-Modellen überprüft werden, basierend auf Methoden die aus der Computer Vision (CV) stammen. Hierbei sollen im Speziellen die Möglichkeiten, die der Videomodus der Kamera für die Aufnahme bietet untersucht werden.

Die automatische CV-Prozessierung von Bildern zu 3D-Modellen, als zeit- und arbeitssparende Weiterentwicklung der in der Photogrammetrie üblichen halbautomatischen Datenauswertung von Bildern klang für mich interessant. Die sich daraus ergebenden Problemstellungen zur Durchführung eines Projektes und Untersuchungen zur Genauigkeit motivierten mich, immer mit dem Hintergedanken, wo und wie die Methoden in der Praxis eingesetzt werden könnten.

Eine qualifizierte und quantifizierte Aussage über die Verwendbarkeit des Systems mit der eingesetzten Software bei der Erstellung von Geländemodellen und der Modellierung von Gebäuden sollte nach Abschluss der Arbeit möglich sein. Für mich war es spannend herauszufinden, inwieweit die automatische Prozessierung von UAV-Bildern im Vergleich mit der manuellen Auswertung bzw. gegenüber konventionell, mittels Laserscanner erfasster Objekte mithalten würde können. Den Fokus hielt ich hierbei auf den Bereich der Architektur- und Grundlagenvermessung. Ich testete aber auch Möglichkeiten für die Modellierung von Personen und erwog in welchen weiteren Bereichen die die automatische Prozessierung von UAV-Aufnahmen geeignet wäre eingesetzt zu werden.

Vorteile und Schwächen der Methoden und Abläufe zu erfassen und Überlegungen, wie Verbesserungen erzielt werden könnten, machten diese Arbeit abwechslungs- und lehrreich. Ich konnte mir durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Thema UAV-Photogrammetrie Wissen aneignen in einer chancenreichen Zukunftstechnologie.

Dies war mir möglich dank der Unterstützung und Hilfe von vielen Personen auf die ich stets zählen durfte und bei denen ich mich hiermit herzlichst bedanke.

Einen speziellen Dank richte ich an:

- David Novák in seiner Funktion als Betreuer und Initiator dieser Arbeit
- Prof. Dr. Konrad Schindler als leitender Professor dieser Arbeit
- Prof. Dr. Hilmar Ingensand als Leiter des Instituts, das sämtliches Material und einen Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt hat
- die Mitarbeiter und Assistenten des IGP, im Speziellen Paul Sorber
- alle Kommilitonen, die durch ihre Anwesenheit die Arbeit stets bereicherten
- meine Familie für ihre stetige Unterstützung
- meine Muse Gesa

Zusammenfassung

Die folgende Arbeit untersucht, wie sich UAV-Bildaufnahmen in Verbindung mit automatischer Auswertesoftware aus dem Bereich der Computer Vision zum Erstellen von texturierten 3D-Modellen eignen. Die Grundlage bilden hierbei Videoaufnahmen der am Oktokopter montierten Kamera Lumix DMC LX 3. Ergänzend werden aber auch hochaufgelöste Einzelbilder von UAV-Befliegungen verwendet um Einschränkungen, die aus der systemspezifisch geringen Auflösung des Videomodus resultieren, zu umgehen. In der Arbeit wird der Workflow, von der Datenerfassung, über die Vorverarbeitung der Bilder hin zur Prozessierung mit zwei SfM-Programmen (Bundler und Photosynth mit Photosynth Toolkit) beschrieben. Hierbei werden auch Möglichkeiten zur Verbesserung der Geometrie und zur Georeferenzierung aufgezeigt. Die resultierenden Punktwolken werden analysiert, Vorteile und Schwächen der Methoden daraus abgeleitet. Die photogrammetrische Eignung der eingesetzten Computer Vision Methoden werde kritisch hinterfragt und Optimierungspotential sowie alternative Anwendungsbereiche für sie angegeben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

BPA	Ball Pivot Algorithmus, Vermaschungsmethode
CV	Computer Vision, Forschungsgebiet des maschinellen Sehens
DGPS	Differentielles GPS, differentielle Basislinienmessung
DOG	Difference of Gaussian, Featurepunktdetektormethode
GNSS	Global Navigation Satellite System, allg. Satellitennavigationssystem
GPS	Global Positioning System, US-Satellitennavigationssystem
HCD	Harris Corner Detektor, Featurepunktdetektormethode
HD	High Definition, HD-Aufnahmen sind hochaufgelöste Videoaufnahmen
ICP	Iterative Closest Point, Einpassungsverfahren für Punktwolken
IGP	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich
INS	Inertial Navigation System, Beschleunigungsmesssystem
PMVS	Patched Based Multi View Stereo, Dense-Matching Methode
PS	Photosynth
PSR	Poisson Surface Reconstruction, Vermaschungsmethode
PST	Photosynth Toolkit
SfM	Struture from Motion, CV-Methode zur 3D-Rekonstruktion aus Bildern
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, Drohne
URL	Uniform Resource Locator, Internetadresse

1 Einleitung

3D-Modelle stellen eine digitale Kopie realer Objekte dar. Sie bieten viele Möglichkeiten das Objekt virtuell zu erfassen. Sei es aufgrund des interaktiven Zugangs, z.B. durch Wahl der Betrachtungsperspektive, oder durch das leichte Editieren, um Variantenstudien zu betreiben. Im heutigen Alltag bilden 3D-Modelle eine wichtige Grundlage. Sie sind in vielen Bereichen anzutreffen. Als 3D-Stadtmodelle sind sie im Bereich der Navigation und Planung etabliert. Detaillierter findet man sie in der Architektur, der Denkmalpflege oder Archäologie. Ihre Erfassung erfolgt entweder aktiv, z.B. mittels Laserscannern oder passiv, mittels Photosensoren. Die passive Erfassung mit Bildern und deren Auswertung ist als Photogrammetrie bekannt. Bisher war die Photogrammetrie zu einem gewissen Teil, meist im Rahmen der Orientierung der Bilder, auf manueller Bearbeitung aufbauend. Mit den Methoden aus der Computer Vision (CV) ist eine automatische Prozessierung von Bildern zu 3D-Modellen möglich, die kein Eingreifen des Benutzers erfordert. Die zugrunde liegenden Techniken sollen im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit erfasst werden. Ausserdem soll untersucht werden, inwieweit die Methoden der CV in der Photogrammetrie einsetzbar sind.

1.1 Aufgabenstellung

Die Kamera auf dem Oktokopter besitzt einen Videomodus, der es erlaubt, ein Video in einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln und 30 Bildern pro Sekunde aufzunehmen. Es wäre interessant zu sehen, inwiefern sich diese Bilder zur Rekonstruktion von Objekten eignen würden.

In einem ersten Schritt sollen die Bilder aus dem Video extrahiert und genauer untersucht werden.

Neben der Möglichkeit, ein Objekt manuell mittels dieser Bilder zu modellieren, soll auch untersucht werden, inwiefern sich die Bilder zur automatischen Auswertung eignen. So könnte zum Beispiel das Wissen über eine einigermassen konstante Flugbahn ausgenutzt werden, um bei den automatischen Messungen eine gewisse Suchraumreduktion zu definieren.

Es sollen im ersten Schritt Literaturrecherchen bezüglich SIFT, SURF und ähnlichen Interestoperatoren sowie deren Matching durchgeführt werden.

Matlab libraries und bestehende Funktionen sollten ebenfalls recherchiert und deren Nutzbarkeit überprüft werden. Des weiteren sollen Recherchen zwecks Extrahierung von Einzelbildern aus dem Video, sowie Nachbearbeitungsmöglichkeiten der betreffenden Bildern angestellt werden. In den nächsten Schritten sollen zwei Bildern zueinander gematcht werden. Sobald dies funktioniert sollen weitere Bilder verwendet werden um einen photogrammetrischen Block zu bilden. Die GPS-Messungen des Oktokopters können hierbei als Approximation verwendet werden.

1.2 Ausgangslage

Das institutseigene UAV steht für Befliegungen zur Erfassung von Objekten mittels Videoaufnahmen zur Verfügung. Für die Auswertbarkeit des Bildmaterials müssen geeignete Objekte und Aufnahmekonfigurationen gefunden werden. Die Umsetzung der Flugplanung erfolgt im Feld durch den Piloten, der für die Steuerung zuständig, und einer zweiten Person, die quasi als Regisseur für die Bildaufnahmen verantwortlich ist. Wird das Objekt vollumfänglich umflogen und erfasst, so steht Bildmaterial zur photogrammetrischen Auswertung zur Verfügung. Im Fall der Arbeit soll das UAV-

Bildmaterial auf seine Eignung zur automatischen Prozessierung zu einem 3D-Modell hin untersucht werden. Für die Bildbearbeitung sind diverse Programme zur Bildaufbereitung und Bildprozessierung auf dem Markt vorhanden. Bei der Softwareauswahl wurde jedoch darauf geachtet, dass die Programme für den Privatgebrauch kostenlos verfügbar sind.

1.3 Ziel der Arbeit

Heutige Digitalkameras bieten die Möglichkeit Objekte im Videomodus in kurzer Zeit umfassend aufzunehmen. Die grosse Übereinstimmung des Bildinhalts mit nur kleinen Veränderungen zwischen benachbarten Bildern ist eine gute Voraussetzung für das Finden identischer Punkte in den Bildern, das sogenannte Matching. Die hierdurch gewonnenen Bildmessungen fliessen in eine Bündelblock-ausgleichung ein. Als Ergebnis liefert sie die Rekonstruktion der Kameraaufnahmepositionen, die Bestimmung der Kameraparameter und die Bestimmung der 3D-Punktlage der Verknüpfungspunkte. Durch anschliessendes Dense-Matching, was als ein Verdichten zwischen den Featurepunkten aufgrund gleicher photometrischer Eigenschaften von Pixeln in einer Art Region Growing verstanden werden kann, wird das Modell ergänzt. Dadurch wird die Darstellung des Objekts in einer dichten, echtfarbenen 3D-Punktwolke möglich.

Die vorliegende Arbeit soll untersuchen, wie der beschriebene Prozess auf Grundlage von Methoden aus der Computer Vision mit grösstmöglicher Automation abläuft, und dabei unterschiedliche Programme und Ergebnisse vergleichen. Ausserdem soll die Eignung des Videomodus der Panasonic Kamera in dieser Art der Bildgewinnung und –auswertung bewertet werden. Zu diesem Zweck wird Bildmaterial mit dem Oktokopter im Videomodus erfasst, es werden aber auch bestehende UAV-Aufnahmen und Handaufnahmen verwendet. Eine Bewertung im Hinblick der eingesetzten Methoden und Komponenten sollte durch Vergleich mit bestehenden Modellen und Auswertemethoden möglich sein. Aus der Analyse der Methode sollen Vorteile und Schwächen der Methoden und Systeme abgeleitet werden, sowie Bereiche der weiteren Nutzung benannt werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in 12 textliche Abschnitte, deren Reihenfolge und Inhalt hier kurz wiedergegeben wird.

Der Einleitung schliesst sich das 2. Kapitel „Unmanned Aerial Vehicle - UAV“ an. In diesem wird kurz auf die wichtigsten Systemkomponenten eines UAV für die Nutzung in der UAV-Photogrammetrie eingegangen.

Der darauf folgende 3. Abschnitt „Kamera“ befasst sich mit der zu untersuchenden Kamera des Oktokopters, dem Panasonic Modell Lumix DMC LX 3. Die Kamerakalibrierung und Tests zur Auflösung und Belichtung im Videomodus werden ebenso behandelt.

Der 4. Absatz „Bildvorverarbeitung“ zeigt die notwendigen Schritte auf, um aus den Kameraaufnahmen im Video- oder Einzelbildmodus zu Bildmaterial für die Prozessierung zu gelangen. Er ist unterteilt in die vier Schritte, Zerlegung der Videosequenz in Einzelbilder, Editierung der Exif-Daten, Bildumbenennung, sowie Korrektur der Verzeichnungen.

Im 5. Kapitel „Methoden zur automatischen Featurepunktbestimmung und Matching“ werden die zugrundeliegenden Methoden der automatischen Prozessierung dargestellt. Diese sind der Featurepunktdetektor SIFT, der Dense-Matching Algorithmus PMVS und das SfM-Programm Bundler.

Der 6. Absatz „Bildverarbeitung – Bundler Variante“ zeigt die Vorgehensweise bei der automatischen Prozessierung mit dem Programm Bundler.

Das 7. Kapitel „Bildverarbeitung – Photosynth-Toolkit Variante“ stellt die automatische Prozessierung in der Programmkombination von Photosynth und Photosynth Toolkit dar. Hierbei werden die Abläufe und die resultierenden Daten der Programme detailliert beschrieben.

In Abschnitt 8 „Modellierung und Analyse“ werden Möglichkeiten zur automatischen Vermaschung der aus den Prozessierungen gewonnenen Daten aufgezeigt. Die Funktionsweisen der beiden hierfür verwendeten Methoden, Poisson Surface Reconstruction und Ball Pivot Algorithmus, werden erläutert. Des weiteren umfasst das Kapitel die Analyse anhand unterschiedlicher Parametereinstellungen prozessierter Modelle und zeigt häufig auftretende Fehler, sowie die Verzeichnung als Hauptursache der Fehler auf.

Im 9. Absatz „Vergleich zu Testdaten“ werden erstellte Modelle auf ihre Plausibilität hin überprüft. Dies erfolgt aufgrund einer Transformation und geometrischer Tests.

Kapitel 10 „Ergebnisse“ fasst die Analysen und im Zuge der Arbeit gewonnenen Einsichten zu einer Gesamtbewertung zusammen.

In Abschnitt 11 „Fazit“ wird ein Resümee über die Arbeit und die verwendeten Methoden gezogen, wie auch der Blick auf alternative Entwicklungen und Verbesserungspotential gelenkt.

Im letzten textlichen Kapitel 12 „Ausblick“ wird ein Blick in die nähere und weitere Zukunft aufgrund der aktuellen Entwicklungen gewagt.

2 Unmanned Aerial Vehicle - UAV

UAV sind kleine unbemannte Flugmaschinen die mittels Fernbedienung vom Benutzer gesteuert werden oder auf vorprogrammierten Flugrouten selbstständig durch die Luft fliegen. (Heider, 2006)

2.1 Allgemein

Es gibt eine Vielzahl von UAVs, unterschiedlichster Bauart, Grösse, Flugmodi und Kosten. Ihre Einsatzbereiche in militärischer, polizeilicher und ziviler Nutzung sind weitgestreut, von Aufklärung über Transport bis zu aktivem Kampfeinsatz. Dienen sie wie in dieser Arbeit als Aufnahmeplattform für die Luftbildbefliegung, so ist der Begriff der UAV-Photogrammetrie eingeführt (Eisenbeiss, 2009). Der folgende Abschnitt konzentriert sich auf das verwendete UAV, das Modell Oktokopter Falcon 8 der Firma Ascending Technologies, bzw. dessen Bauteile, die für eine Verbesserung der automatischen Bildverarbeitung von Bedeutung sein können. Abbildung 1 zeigt diverse low-cost UAVs, mittig ist der Oktokopter dargestellt. Allgemeine Angaben zu UAVs finden sich in früheren Arbeiten zum Thema UAV-Photogrammetrie, beispielsweise von Eisenbeiss (Eisenbeiss, 2009). Detailliertere Untersuchungen zum Oktokopter sind von Friedli erstellt worden (Friedli, 2010). Auf den Oktokopter in der UAV-Photogrammetrie geht die Masterprojektarbeit des Autors ein (Ober, 2010).



Abbildung 1: Darstellung diverser ziviler UAV (Eisenbeiss, 2009), um den mittig platzierten Oktokopter (Friedli, 2010)

2.2 Wichtige Systemkomponenten

Zu den wichtigen Systemkomponenten eines UAVs, das für die UAV-Photogrammetrie geeignet sein soll, zählen neben der Kamera und der Livebildübertragung, die positionsgebenden Systeme (GNSS/INS/Kompass/Barometer). Sie ermöglichen zum einen die Durchführung von autonomen Flügen, zum anderen sind sie für die direkte Georeferenzierung der Bilder, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, Voraussetzung. Ihre Positionsdaten können als Näherungswerte in die Bündelblockausgleichung einfliessen.

2.2.1 Global Navigation Satellite System (GNSS)

Ein Satellitennavigationssystem an Bord des UAVs dient dazu die Position des Fluggeräts zu erfassen. Diese fliesst bei der Umsetzung einer koordinatenmässig festgesetzten Flugplanung als Soll-Ist-Abgleich in die Flugroutenverfolgung ein. Für die Orientierung der Bilder kann die mittels GNSS bestimmte Aufnahmeposition als Näherungskoordinate dienen, bzw. muss für die direkte Georeferenzierung obligatorisch verwendet werden. Durch GNSS lassen sich aber auch die Flugeigenschaften verbessern. Hierbei ist die Möglichkeit der Positionsstabilisierung gemeint. Werden Lageveränderungen nicht durch Steuerungsbefehle verursacht, sondern aufgrund von Wind erzeugt, so können diese mittels GNSS erfasst und zum Korrigieren der Position verwendet werden. Eine Steigerung der Positionierungsgenauigkeit ist durch die Kombination von GNSS mit inertialen Navigationssystemen (INS), bzw. durch Verwendung von differentiellem GPS (DGPS) zu erlangen. (Ober, 2010)

2.2.2 Inertiales Navigationssystem (INS)

Aufgabe eines INS, auch als Trägheitsnavigationssystem bezeichnet, ist das Erfassen der Beschleunigung und Drehrate mit Hilfe von Beschleunigungssensoren. Für die Erfassung der 6 Freiheitsgrade der Beschleunigung werden 3 orthogonal angeordnete translatorische Trägheitssensoren mit 3 ebenfalls orthogonal angeordneten Gyroskopen (Kreiseln), für die Drehratenänderungen, kombiniert. Über einfache bzw. zweifache Integration der Beschleunigung eines Körpers über die Zeit, kann die Geschwindigkeit bzw. Position bestimmt werden. Der Verkippungswinkel im inertialen Raum ergibt sich aus der Integration der gemessenen Winkelgeschwindigkeiten über die Zeit in den drei Raumrichtungen. Die fortlaufende Integration führt zum Anwachsen des Positionierungsfehlers mit der Zeit. Um dieses Anwachsen zu begrenzen wird das INS mit GNSS kombiniert [wiki-INS, 2010], auch ist ein Abgleich mit dem elektronischen Kompass und dem Barometer denkbar. Die Güte eines INS zeichnet sich durch eine hohe Auflösung und geringe Drift aus. (Ober, 2010)

2.3 Sensordatenfusion für Georeferenzierung

Für die direkte Bestimmung der Ausrichtung der Kamera des Oktokopters müssen die Positionsdaten des GNSS-Moduls, die Verdrehungen und Verkippungen die mittels INS bestimmt werden, die Ausrichtung aufgrund des elektronischen Kompass, die Höhenmessung des Barometers und die relative Ausrichtung der motorgesteuerten Kameraaufnahme kombiniert werden. Neben dem Wissen zur relativen Lage der Systeme zueinander, ist die Zeitsynchronisation aller beteiligten Systeme wichtig. Die Integrationszeiten der einzelnen Systemschritte sind ebenso zu beachten um eine genaue Kombination der Sensordaten durchführen zu können. Eine Eintragung der aus der Sensordatenfusion resultierenden 3D-Kameraposition samt 1D-Aufnahmerichtung in die Exifdaten des Bildes wäre bereits heute technisch möglich. Tabelle 9 zeigt die GPS-Positionsdaten die als Bildmetadaten in Exif-Einträgen abgespeichert werden können. Diese Möglichkeit wird aber vom Oktokopter derzeit nicht unterstützt.

Der Oktokopter protokolliert allerdings die Positionen des UAV samt Ausrichtung, sowie die Auslenkung der Kameraaufnahme und weist diese im Protokollfile der Befliegung aus (Friedli, 2010, S. 10). Eine selbstständige Weiterverarbeitung und Zuordnung zu den Exif-Daten wäre somit möglich.

Falls ein Digitales Oberflächenmodell im beflogenen Bereich verfügbar wäre, so könnten über die weitere Kombination der Position mit der Kameraausrichtung und den Kameraparametern (Brennweite, belichtete Sensorfläche, Pixelgrösse, Verzeichnung), die in den Bildern abgebildeten Objektbereiche berechnet werden. Dies würde eine Zuordnung des Objektraums zum Bildraum bedeuten. Die Sichtbarkeiten unter den Bildern könnten hieraus bestimmt werden und als prozessbeschleunigende Vorgabe in die Bündelblockausgleichung und in das Dense-Matching eingehen.

3 Kamera

3.1 Kamera Lumix DMC LX 3

Die Digitalkamera Lumix DMC LX 3 von Panasonic ist eine Kompaktkamera mit 24 mm Weitwinkelobjektiv im 35mm-Kleinbildaquivalent und kann mit unterschiedlichen Bildgrössenformaten (4:3, 3:2, 16:9) Bilder aufnehmen. Sie besitzt die Möglichkeit der manuellen Fokussierung, wodurch eine, mittels Kalibrierung gewonnene innere Orientierung der Kamera reproduzierbar ist. Für die low-cost UAV-Photogrammetrie ist die LX 3 aufgrund folgender Eigenschaften prädestiniert:

- manueller Fokus einstellbar
- geringes Gewicht: 265 g
- im Vergleich zu anderen Kameras der Gewichtsklasse relative grosser, lichtstarker Sensor mit 2 μm Pixelgrösse
- kurze Belichtungszeit einstellbar: 1/2000 Sek
- lichtstarkes Objektiv: F 2.0
- Videomodus zur Aufnahme und als Livebild nutzbar



Abbildung 2: Lumix DMC LX 3

3.2 Kamerakalibrierung

Die Kamerakalibrierung dient der Ermittlung der inneren Orientierung der Kamera, d.h. der Kamerakonstanten c und der Lage des Bildhauptpunktes x_0, y_0, sowie zusätzlicher Parameter die eine Bestimmung der Verzeichnungseffekte erlauben (Luhmann, 2003). Da die Kamera 3 Bildformate und eine variable Fokussierung besitzt, müsste für jede spezifische Konfiguration, mit der photogrammetrisch auszuwertende Bilder gemacht werden, eine Kalibrierung durchgeführt werden. Für die Video-Befliegungen im Projekt wird nur das Bildformat 4:3 ohne Zoomfunktion verwendet. Es bietet die grösste Bildfläche und ist das einzige, bei dem eine direkte Livebildübertragung des Bildes der Kamera auf die Steuereinheit funktioniert. Nur für dieses Format, in Kombination mit der beim Einschalten im manuellen Modus automatisch eingestellten Fokussierung, wird die Kalibrierung durchgeführt. Für die Verzeichnungskorrektur der hochaufgelösten Einzelbildaufnahmen wird eine weitere Kalibrierung, wie unter Kapitel 4.4 beschrieben, durchgeführt.

3.2.1 Kalibrierungsauswertung

Für die Kamerakalibrierung wird das Programm Australis verwendet. Als Ausgangsdaten sind die Bilder der Testfeldaufnahmen und die Pixelgrösse einzuführen. Um gute Aufnahmen der neonfarben codierten Targets zu erhalten, die in Australis automatisch ausgewertet werden können, empfiehlt es sich, das Kalibrationsfeld auf mattem, schwarzen Untergrund zu installieren. Die Pixelgrösse ist nicht vom Hersteller zu erfahren und wird auf Grundlage der im Rahmen der Masterprojektarbeit des Autors durchgeführten Überlegungen modifiziert (Ober, 2010, S. 13 ff.). Die dort mit 2 µm angenommene Pixelgrösse ist um den Faktor 5,7 zu multiplizieren und ergibt somit eine Pixelgrösse von 11,4 µm für die Videobildaufnahmen. Ursache für den Multiplikationsfaktor ist die im

Videomodus angewendete Bildskalierung von 3648 x 2736 Pixel belichteter Sensorfläche auf 640 x 480 Pixel komprimierte Videobildauflösung, die in Kapitel 3.3.1 erläutert wird.

3.2.2 Kalibrierungsergebnisse

Die aus der Kamerakalibrierung mit 11.4 µm Pixelgrösse resultierenden Werte sind:

Sensorgrösse: 640 pixel x 480 pixel, bzw. 7.296 x 5.472 mm²

Kamerakonstante c= 5.194 mm

Lage des Bildhauptpunktes: x_0= 0.0060 mm; y_0= -0.0124 mm

Radial-symmetrische Verzeichnung: K1= 1.05861e-003; K2= 2.62853e-005

Der Term 7. Ordnung der radial-symmetrischen Verzeichnung (K3), die radial-asymmetrische Verzeichnung (P1, P2) und Werte für Affinität und Scherrung (B1, B2) wurden nicht berechnet. Grund hierfür ist, dass in Bundler und Photosynth nur K1 und K2 im Rahmen der Bündelblockausgleichung angegeben werden und hierfür ein Vergleichswert geschaffen werden soll. Die Werte zum Verlauf der sogenannten Verzeichnungskurve sind in Tabelle 1 in metrischer Form, bezogen auf den Bildhauptpunkt ersichtlich.

r [mm]	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
dr [µm]	0.0	+0.1	+1.1	+3.8	+9.3	+19.1	+35.0	+59.2	+94.7	+145.0

Tabelle 1: Verzeichnungswerte (dr) des Videomodus in Abhängigkeit vom Bildhauptpunktabstand (r)

Die Werte basieren auf der Auswertung von 37 in die Software Australis eingelesener Bilder mit einer berechneten Genauigkeit der Bildreferenzierung von 0.1 Pixeln, was metrisch 1,1 µm entspricht. Eingeführt in photogrammetrische Auswerteprogramme ermöglichen sie die rechnerische Berücksichtigung der Verzeichnung und abweichenden Strahlengeometrie. Hierbei ist zu beachten, dass unterschiedliche Programme mitunter nicht alle Parameter verarbeiten können. Deshalb sollte die Kalibrierung, wie beschrieben, angepasst an das Auswerteprogramm erfolgen.

3.3 Videomodus

Der Videomodus der Kamera ist nur in den Bildformaten 4:3 und 16:9 vorhanden. Das Format 16:9 würde auch Aufnahmen in HD (High Definition) mit 1280 x 720 Pixeln ermöglichen. Wegen Übertragungsproblemen des Livebilds vom Oktokopter zur Fernbedienung in diesem Format, ist nur das Fliegen und Aufnehmen im Format 4:3 mit 640 x 480 Pixeln und 30 Bildern pro Sekunde sinnvoll.

3.3.1 Auflösung

Der CCD-Sensor (Charged Coupled Devices) der Lumix LX 3 hat im Format 4:3 eine maximal nutzbare Pixelfläche von 3648 x 2736 Pixel. Um zu überprüfen, wie die im Videomodus resultierende Bildgrösse von 640 x 480 Pixeln zustande kommt, wurden Testaufnahmen in Form hochaufgelöster Einzelbilder und im wenig aufgelösten Videomodus gemacht. Ein Vergleich der Bilder zeigt, dass die pixelärmeren Bilder den gleichen Bildbereich darstellen wie die hochaufgelösten Bilder. Da die Brennweite der Kamera in beiden Modi identisch ist, muss bei der reduzierten Pixelzahl also zunächst auch die ganze Sensorfläche belichtet werden. Wie jedoch die Farbwerte im reduzierten Bild

gewonnen werden, ob durch diskrete Verwendung jedes 5,7 x 5,7 Pixels oder eine durch Mittelbildung über 5,7 x 5,7 Pixel kann nicht mit Sicherheit geklärt werden. In Abbildung 3 bis Abbildung 6 sind die Testbilder und Teilausschnitte von diesen zu sehen. Der identische Bildbereich wird aus Abbildung 3 und Abbildung 4 ersichtlich, die Reduktion der Bildinformationen kann in Abbildung 5 und Abbildung 6 gesehen werden. Da im reduzierten Bild offensichtlich keine Mischfarben im Vergleich zum hochaufgelösten Bild auftreten und das Abspeichern diskreter Werte zeitlich schneller ablaufen dürfte als eine, wie oben beschriebene Mittelbildung, wird vermutet, dass die Skalierung auf diskreten Pixelwerten beruht.

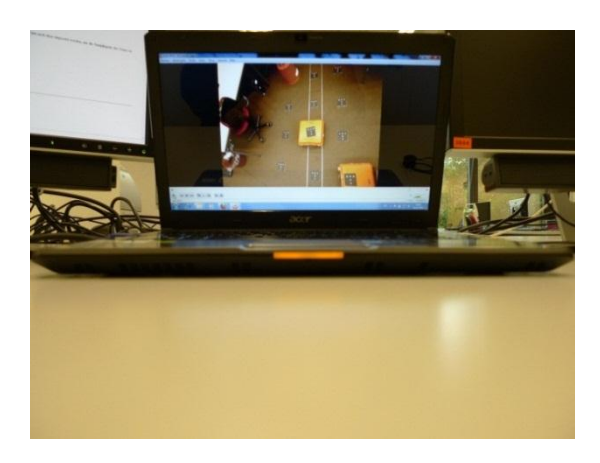


Abbildung 3: Hochaufgelöstes Testbild (3648 x 2736 Px)

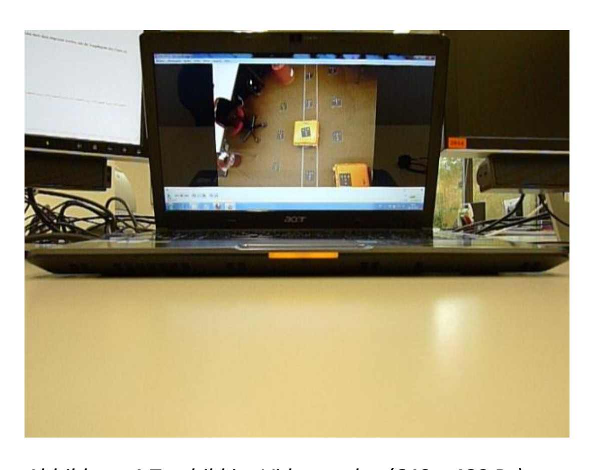


Abbildung 4:Testbild im Videomodus (640 x 480 Px)

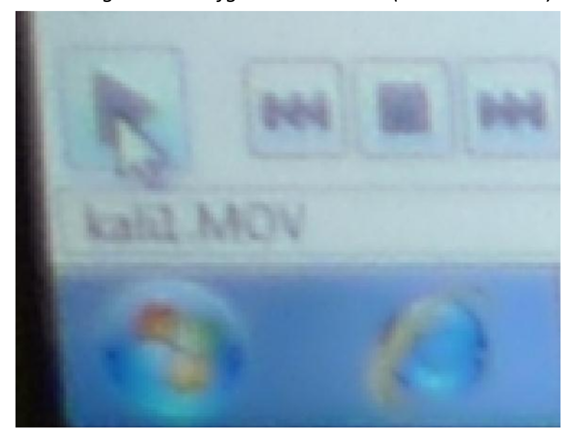


Abbildung 5: Teilausschnitt von Abbildung 3

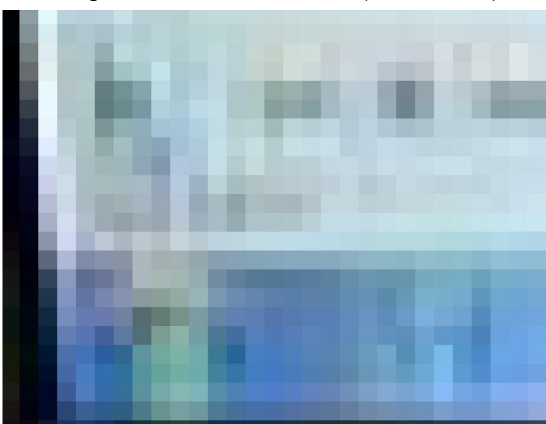


Abbildung 6: Teilausschnitt von Abbildung 4

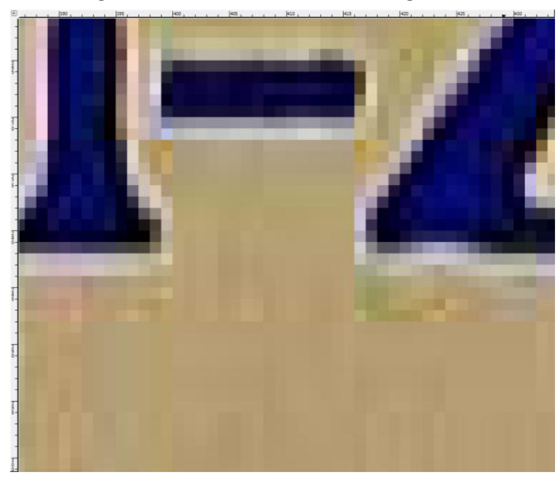




Abbildung 7:Kompresionsartefakte; li.: JPG-komprimiertes Videobild (640 x 480 Px), re.: Originalbild (3648 x 2736 Px)

Bei genauerer Betrachtung zeigen die auf Kompression basierten Videobilder Reduktionsartefakte, wie in Abbildung 7 dargestellt. Solche Artefakte können das Matching beeinträchtigen, da die

Featurpunkterstellung in den Artefakten Strukturen erkennt, die in Wirklichkeit nicht und in den anderen Bildern wahrscheinlich nicht an der gleichen Position vorhanden sind. In Abbildung 7 ist links das JPG-komprimierte Videobild mit Reduktionsartefakte im typischen 8x8 Pixel-Muster der verlustbehafteten JPG-Kompression zu sehen. Die JPG-Kompression basiert auf DKT (Diskrete Kosinus Transformation). Rechts ist das mit der vollen Sensorgrösse aufgenommene Bild dargestellt.

3.3.2 Belichtungszeit

Im VGA-Videomodus im Format 4:3 werden 30 Einzelbilder pro Sekunde gemacht. Ob hierdurch auch auf eine Belichtungszeit von 1/30 Sekunde rückgeschlossen werden darf, ist Teil der Untersuchung zur Belichtungszeit im Videomodus. Da im Handbuch und bei der Onlinerecherche keine Angaben zur Belichtungszeit im Videomodus gefunden werden konnten, wurde ein eigener Testaufbau zur Abschätzung der Belichtungszeit erstellt. Im Allgemeinen wären eine Belichtung von 1/30 Sekunden bei ruhigen Aufnahmepositionen und unbewegten Objekten nicht von Nachteil. Bei der Montage der Kamera am Oktokopter jedoch kann eine zu lange Belichtungszeit zu Bewegungsunschärfe führen, die sich negativ auf die Bildauswertung auswirkt.

3.3.3 Test zur Belichtungszeit

Ziel des Testaufbaus ist es eine Bewegung die mit bekannter Geschwindigkeit (v) stattfindet im Videomodus aufzunehmen und die Bewegungsunschärfe (s) im Bild anhand des Schweifs des sich bewegenden Objekts zu ermitteln. Hieraus kann die Belichtungszeit (t) aus der Formel $t = s\ /\ v$ berechnet werden.

Für den Test, der in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt ist, wurde ein regelbarer Elektromotor mit einer schwarzen Scheibe bestückt, auf die weisse Markierungen aufgetragen waren. Da die Drehgeschwindigkeit nicht direkt in Umdrehungen pro Zeiteinheit angegeben werden konnte, wurde angenommen, dass die Framerate mit 30 Bildern pro Sekunde konstant sei. Durch Auszählen der Umdrehungen pro Zeiteinheit anhand der aufgenommenen Videosequenzen konnte somit die Drehgeschwindigkeit ermittelt werden.

Mit Hilfe eines Bildschirmmesstools des Programms PicPick[1] konnte die Länge des Schweifs der hellen Punkte als Zwischenwinkel gemessen, und über die bekannte Entfernung der Markierung vom Drehzentrum die Bahngeschwindigkeit berechnet werden. Abbildung 8 und Abbildung 9 stellen zwei Aufnahmen der Scheibe dar. Erstere zeigt die Scheibe bei Stillstand, Zweitere bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 6,1 Umdrehungen pro Sekunde. Hier ist der Schweif der Bewegungsunschärfe der weissen Markierung gut zu erkennen und seine Länge als Zwischenwinkel bestimmbar.

[1] PicPick, Programm für Screenshots und Bildbearbeitung, Info: www.picpick.org, Stand: 27.01.2011

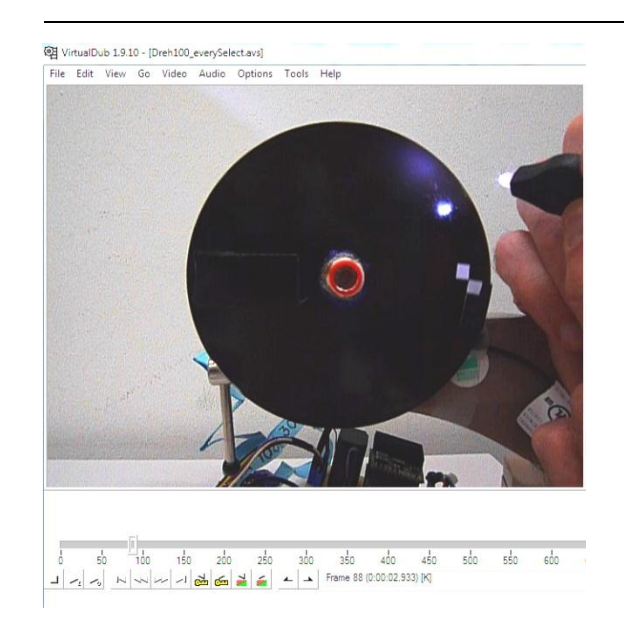


Abbildung 8: Drehscheibe im Stillstand

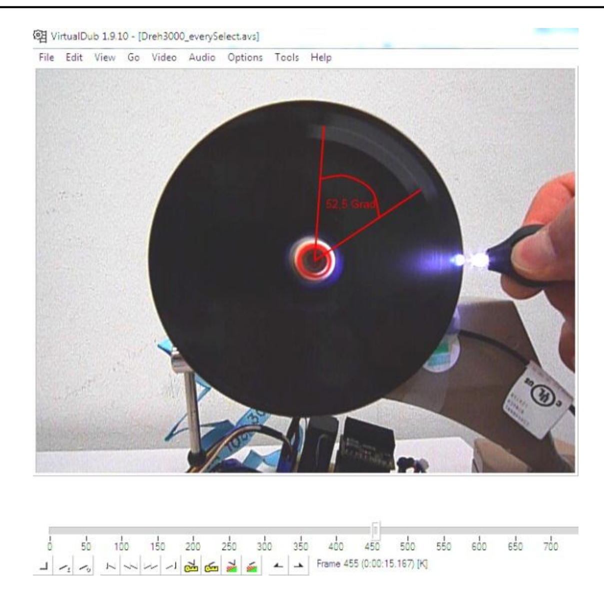


Abbildung 9: Drehscheibe mit 6,1 U/s und gemessener Bewegungsunschärfe

Die Auswertung des Belichtungsversuchs zeigt, dass die Belichtung nicht mit 1/30 Sekunde angegeben werden kann, sondern sich entsprechend der Belichtungsverhältnisse anpasst. Im dargestellten Beispiel beträgt die berechnet Belichtungszeit 1/42 Sekunde. Dieser Wert korrespondiert mit dem in den Exif-Daten des zur Videosequenz abgespeicherten JPG-Bildes von 1/40 Sekunde. Tabelle 8 mit der Auswertung der durchgeführten Drehaufnahmen ist im Anhang beigefügt.

Für die Verwendung am Oktokopter im Videomodus ist die Kamera also je nach Lichtverhältnissen und Eigenbewegung des Oktokopters geeignet. Bei den mit Bedacht durchgeführten Videobefliegungen, die allesamt bei windstillen Bedingungen und guten Lichtverhältnissen stattfanden, ist Bewegungsunschärfe nicht vorhanden.

4 Bildvorverarbeitung

Die Objektaufnahme im Videomodus bedingt eine Vorverarbeitung des Filmmaterials zu Einzelbildern um anschliessend die eigentliche Bildverarbeitung durchführen zu können. Des weiteren wird in Abschnitt 4.4 gezeigt wie eine Verzeichnungskorrektur an die Bilder angebracht werden kann, die sich positiv auf die Prozessierung und deren Ergebnisse auswirkt.

4.1 Zerlegung der Videosequenz in Einzelbilder

Die Videosequenzen können mit dem Programm Virtual Dub[2], einem Skript basierten Videobearbeitungsprogramm, zu Einzelbildern zerlegt werden. Dies kann „frame by frame" für sämtliche Einzelbilder erfolgen, oder in einem bestimmten Intervall. Entscheidend für die Auswahl ist die Qualität und Aufnahmegeschwindigkeit der Aufnahme. Nach einem ersten Sichten des Bildmaterials ist die Abdeckung des zu modellierenden Objekts bekannt. Ebenso wird beim Ansehen des Videos erkannt, ob Bewegungsunschärfe in den Bildern vorhanden ist. Tritt Bewegungsunschärfe nur vereinzelt auf, so muss bei der Auswahl der Einzelbilder keine Rücksicht genommen werden. Ist sie ein häufiges Problem, so muss die Auswahl davon nicht betroffene Frames umfassen und manuell durchgeführt werden. Da die Videoaufnahmen der durchgeführten Flüge kaum Bewegungsunschärfe aufweisen, wurde für die Einzelbilderstellung pauschal jeder 25. Frame ausgewählt. Dies entspricht einem Zeitintervall von knapp einer Sekunde zwischen benachbarten Bildern. Für die Skript Erstellung eignet sich ein einfacher Texteditor. Die Befehle können diversen Foren entnommen werden. In Abbildung 10 ist ein Skript zur Zerlegung eines Videos im MOV-Format in jedes 25. Bild dargestellt. Wichtig ist Speicherung des Skripts als AVS-Datei mit der Endung *.avs.

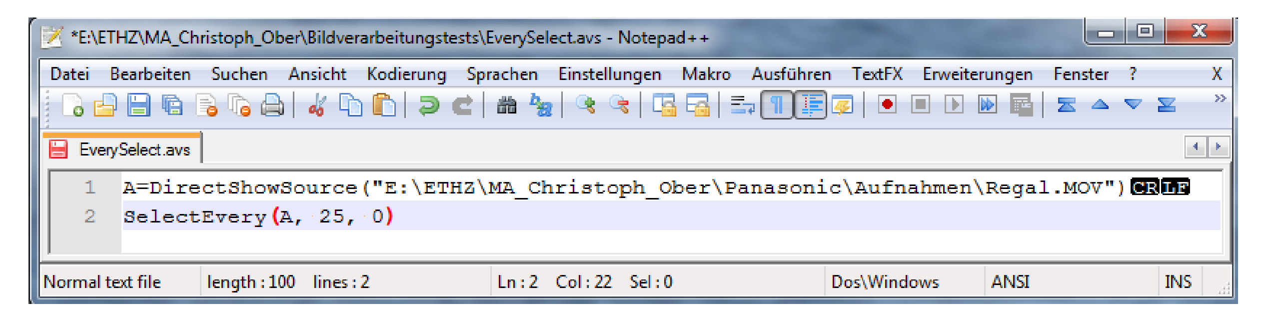


Abbildung 10: Skriptdatei in Editor zur Auswahl jedes 25. Videoframes einer MOV-Videodatei

Wird die Skriptdatei mit Virtual Dub geöffnet, so sind nur die ausgewählten Frames sichtbar und können als Einzelbilder exportiert werden. Die Einzelbilder können mit Präfix versehen und mit einer ergänzenden, aufsteigenden Nummerierung in den 4 Bildformaten (JPG, TARGA, PNG, BMP) abgespeichert werden. Für das JPG-Format ist zusätzlich der Komprimierungsfaktor wählbar. Diese Option kann für HD-Videoaufnahmen eine sinnvolle Datenreduktion ergeben. In der durchgeführten Arbeit wurden die Bilder jedoch unkomprimiert abgespeichert.

[2] Virtual Dub, Version 1.9.10, Info: www.virtualdub.org/, Stand: 27.01.2011

4.2 Editierung der Exif-Daten

Die Bildmetadaten der exportierten Einzelbilder sind unvollständig gegenüber direkt mit einer Kamera aufgenommener Bilder. Für eine weitere Verarbeitung ist deshalb mitunter die Ergänzung der im Exif-Format (Exchangeable Image File Format) in den Bilder enthaltenen Metadaten erforderlich. Die für die Auswerteprogramme wichtigen Einträge sind hierbei unterschiedlich. Bundler benötigt beispielsweise den Kamerahersteller und das Kameramodell, sowie die Resolution und die Brennweite im 35mm Kleinbildformat. Überflüssige Exif-Informationen werden von den Programmen ignoriert. Die Bildmetadaten die während der Aufnahme für alle Einzelbilder gleich sind, können dem für die jeweilige Videoaufnahme zusätzlich im JPG-Format abgespeicherten Anfangsbild entnommen werden und auf die extrahierten Einzelbilder übertragen werden. Dies ist z.B. für die Brennweite möglich, da die Kamera im Videomodus keine Zoomfunktion besitzt und sich an der Bildgeometrie während der Filmaufnahme nichts ändert. Für die Bearbeitung der Exif-Daten wird das Programm ExifToolGUI[3] verwendet, das in Abbildung 11 dargestellt ist. Es ermöglicht die Editierung sämtlicher Bildmetadaten eines Bildes oder mehrerer Bilder auf ein Mal.

Sollten Angaben zur Position des aus den Videobildern extrahierten Bildes benötigt werden, so wäre eine aufwändige Prozedur, die hier nur theoretisch beschrieben wird, durchzuführen. Die Positionsbestimmung bedürfte einer Zuordnung aus den Positionsdaten des Oktokopters, wie sie unter 2.3 beschrieben werden. Eine Interpolation der Einzelframepositionen, die maximal alle 1/30 Sekunde vorhanden sind, in den diskret aufgezeichneten Track des Oktokopters wäre hierfür nötig. Unerlässlich wäre ein einheitliches Zeitsystem, bzw. das Wissen über den Versatz der Kamerazeit und der auf GPS basierenden Oktokopterzeit. Diese Art der Positionsberechnungen und -übertragung werden im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt.

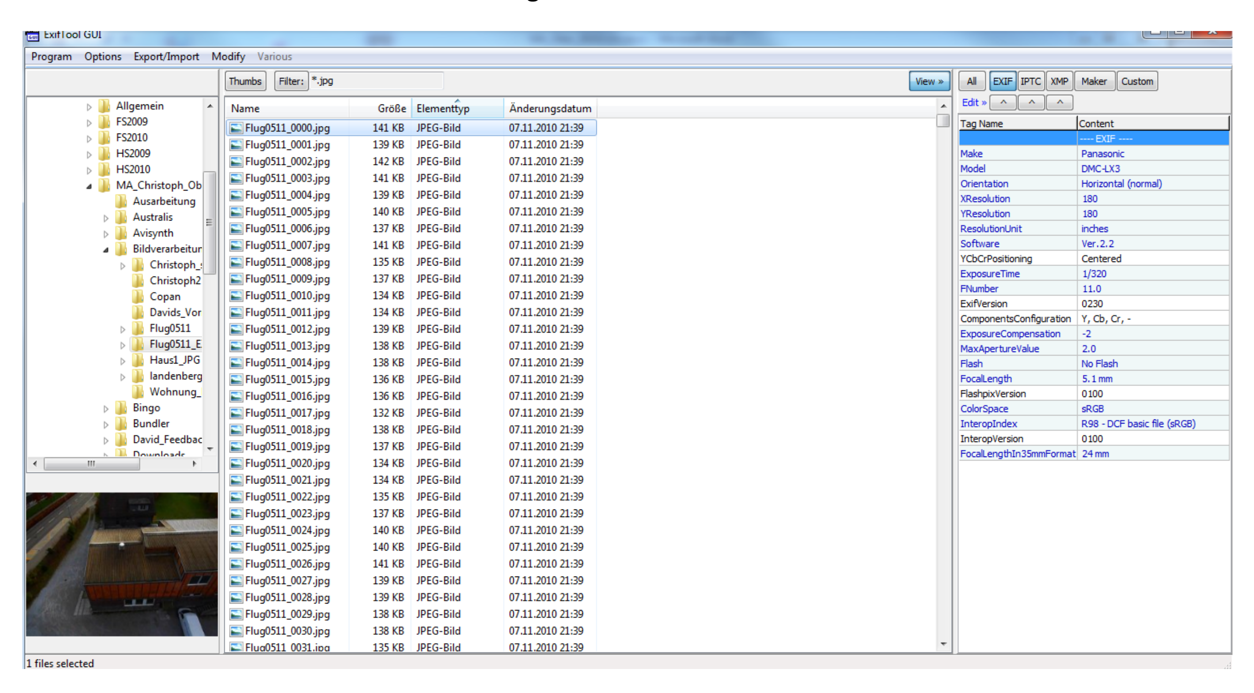


Abbildung 11: Programmansicht ExifToolGUI

Kameras, die einen GNSS-Empfänger und einen elektronischen Kompass integriert haben, schreiben die Aufnahmeposition und Blickrichtung der Kamera ebenso in die Exif-Daten. Für die Georeferen-

[3] ExifToolGUI, Version 3.38 von Bogdan Hrastnik, Info: http://freeweb.siol.net/hrastni3/, Stand: 27.01.2011

zierung der Bilder können diese Daten direkt verwendet werden. Das Programm Geosetter kann hierdurch bereits eine absolute Orientierung der Bilder darstellen. Die Genauigkeit der GPS-Messung und der Nordbestimmung ist für die Aussagekraft jedoch zu berücksichtigen. Testaufnahmen, wie in Abbildung 12 dargestellt, aufgenommen mit dem Garmin Oregon 550, einem handlichen GPS-Navigationsgerät mit eingebauter Kamera und elektronischem Kompass, zeigen, wie die Lageinformationen zur Bilddarstellung verwendet werden. Die Aufnahmepunkte für die Erfassung des Verkehrskreisels wurden in der Örtlichkeit alle gleichmässig verteilt auf den äusseren Fahrbahnmarkierungen gewählt. Die Kamera war jeweils so ausgerichtet, dass sich das Zentrum des Kreisels immer in der Bildmitte befand. Die Abweichung der registrierten GPS-Positionen liegt im Bereich der vom Gerätehersteller vorgegebenen Positionsgenauigkeit von 3-5 m für DGPS. Die der Richtungen liegen im Bereich von +/- 10 Grad, was die Genauigkeitsangabe von +/- 2 Grad übersteigt. (Garmin, 2009) Der Grund für die ungenauere Richtungsmessung ist wahrscheinlich im nicht ausreichend langen Ruhighalten vor dem Auslösen der Bildaufnahme begründet. Der Kompass benötigt einige Zeit, um die Nordrichtung nach Bewegung des Gerätes wieder zu bestimmen. Desweitern ist die höchste Kompassgenauigkeit nur in der horizontalen Lage des Empfängers gegeben, während der Aufnahme befand er sich jedoch in einer vertikalen Position.

Trotz der Ungenauigkeiten könnten die Orientierungsdaten für Prozessierung verwendet werden. Als Näherungswerte könnten diese in die Bündelblockausgleichung einfliessen und ihre relative Orientierung, die aus den Daten ersichtlich ist, einen Startwert für eine schnellere Lösung bilden. Auch das Matching könnte von Orientierungsdaten profitieren. Zum einen könnte durch Ausschluss von Bildpaaren aufgrund ihrer relativen Geometrie, die keine gemeinsamen Punkte zulässt, die Prozessierungszeit verkürzt werden. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit des Matchings könnte die relative Orientierung ebenso beitragen, da die aus dem Initialisierungsbildpaar mittels Matching ermittelte relative Lage hieran überprüft werden könnte. Andersherum könnten die GPS-Orientierungen als Näherungswerte für das Initialisierungsbildpaar und die weiteren Bilder eingeführt werden.

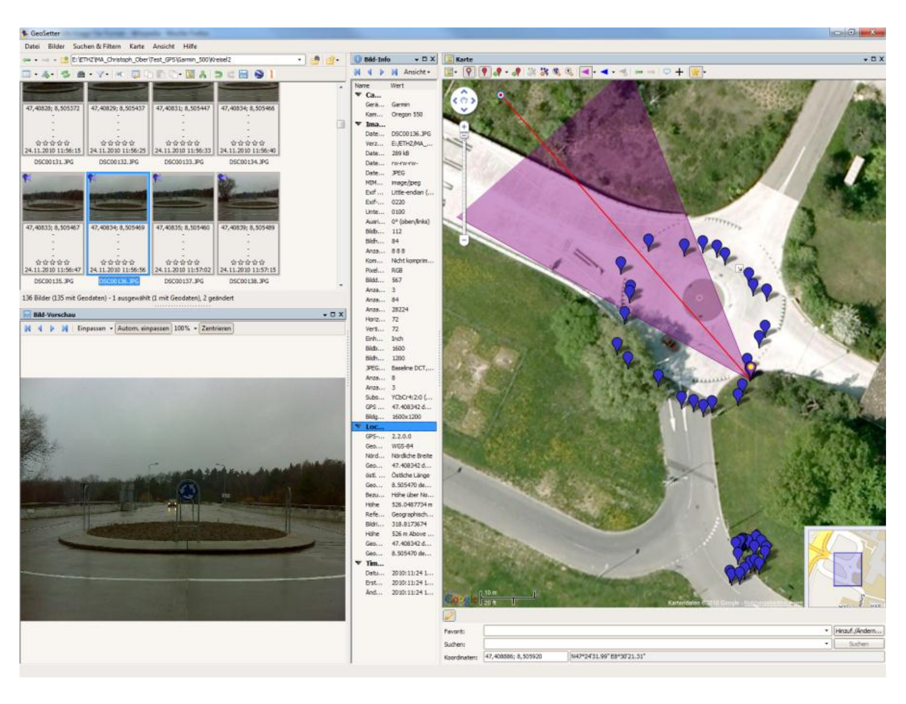


Abbildung 12: Aufnahmeposition und Blickrichtung aus Exif-Daten im Programm GeoSetter

4.3 Bildumbenennung

Aufgrund des Aussortierens einzelner Bilder oder dem Zusammenfügen unterschiedlicher Aufnahmen kann es erforderlich sein, Bildnamen neu und in aufsteigender Reihenfolge zu vergeben, um einen funktionierenden Programmablauf sicherstellen zu können. Mit dem Umbenennungsprogramm Joe[4] ist dies in einfacher Weise möglich. Wichtig für die Programme Bundler und Photosynth Toolkit ist auch, die Bilder mit der richtigen Endung, nämlich als *.jpg, in Kleinschreibung, zu bezeichnen. Dies ist angemerkt, da vorhergehende Programme und unterschiedliche Computer hier auch Varianten zu *.jpeg oder *.JPG verursachen können, welche die Prozessierung verunmöglichen, da die Bilder nicht als solche erkannt werden.

4.4 Korrektur der Verzeichnungen

Die Auswertung aller Datensätze mit Bildern, deren Kameraverzeichnung nicht korrigiert wird, weisen viele Fehler auf, wie in Kapitel 8.3.3 beschrieben. Tests mit Bildern deren Verzeichnung korrigiert wurde und unter 8.3.5 aufgeführt sind, zeigen bessere Resultate. Im Folgenden wird deshalb die Verzeichnungskorrektur beschrieben, die aufgrund einer in Matlab durchgeführten Kamerakalibrierung direkt auf die Bilder angewendet werden kann, und zu verzeichnungskorrigierten Bildern führt.
Für die Verzeichnungskorrektur wird eine Kalibrierungs-Toolbox verwendet, die auf dem Matlabmodul der Bildverarbeitung aufsetzt. Für die beiden Kameraeinstellungen, Videomodus und hochaufgelöste Einzelbildaufnahme, wird jeweils eine Kalibrierung durchgeführt, wie sie in der Programmbeschreibung ausführlich dokumentiert ist[5]. Sie wird deshalb hier nur kurz wiedergegeben.

Die Kalibrierung erfolgt auf Grundlage eines Schachbrettmusters. Dieses muss in ca. 20 Bildern aus unterschiedlichen Positionen aufgenommen werden. Die im A4-Format ausgedruckten Schachbrettmuster sind allesamt zu klein um in der auf unendlich eingestellten Fokussierung ein bildfüllendes, scharfes Abbild zu erhalten. Deshalb wird ein grösseres Schachbrettmuster, das auf einem Flachbildschirm angezeigt wird, verwendet. Abbildung 13 zeigt den Bildschirm samt Muster. Für die Schachbrettmustererstellung ist das Photobearbeitungsprogramm GIMP[6] geeignet. Unter der Menüabfolge Filter → Render → Muster → Schachbrett kann es schnell erstellt werden. Je kleinteiliger das Muster gewählt wird, desto dichter kann die Verzeichnung bestimmt werden. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Flächen in den Aufnahmen noch deutlich getrennt wahrnehmbar sind. Dies ist für die automatische Eckendetektion wichtig, da ansonsten der Detektor bei stark perspektivischen Aufnahmen versagt. Das Muster muss auf allen Bildern komplett erfasst sein. In der Kalibrierungsauswertung muss in jedem Bild der gleiche Rahmen des Schachbretts manuell erfasst werden. Hierfür wurden in jedem Bild die vier inneren Aussenecken gewählt. Mit dieser Vorgabe und der Angabe zur Anzahl der vorhandenen Felder kann die automatische Eckendetektierung vom Programm durchgeführt werden. Die Eckendetektion erfolgt in jedem Bild direkt nach der manuellen Vorgabe. Anschliessend wird, wie in Abbildung 14 dargestellt, mit Farbsymbolen die Eckendetektion zur Verifikation angezeigt.

[4] Joe V 3.5a, Info: http://toolsandmore.de/Central/Produkte/Software/Datei-Tools/Joe/, Stand: 27.01.2011
[5] Camera Calibration Toolbox, Info: www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/example.htmla, Stand: 27.01.2011
[6] GIMP 2, Version 2.6.11



Abbildung 13: Schachbrettmuster für Kalibrierung

Abbildung 14: Automatische Eckendetektion in Matlab

Ist in allen Kalibrationsbildern die Eckendetektion abgeschlossen, kann die Kalibrierung berechnet werden. Zur Verbesserung der Ergebnisse sollte nach der ersten Kalibrierung eine Neuberechnung der Eckendetektion stattfinden und ein weiteres Mal die Kalibrierung gestartet werden. Anschliessend kann die äussere Orientierung, wie in Abbildung 16, hier bezogen auf das Kamerazentrum dargestellt, ausgegeben werden, bzw. können die Kalibrationsergebnisse ausgegeben und verwendet werden.

Die Kalibrierungsergebnisse für den Videomodus sind in Tabelle 2 und Abbildung 15 dargestellt. Anzumerken ist, dass sich die Kalibrierung auf das Brown-Conrady-Modell (Brown, 1966) bezieht und die Längenangaben in Pixeln gemacht werden. Der Nullpunkt des Systems befindet sich, anders als in der Photogrammetrie üblich, nicht im Bildhauptpunkt sondern im Eck des Sensors. Die Lage des Nullpunktes ist in der Abbildung 15 ersichtlich, die die Gesamtverzeichnung, bestehend aus radialer und tangentialer Verzeichnung, im Videomodus darstellt. Die konzentrischen Kreise zeigen die Linien gleicher Verzeichnung und beginnen innen mit einer Verzeichnungskorrektur von zwei Pixeln, nach Aussen hin um jeweils zwei Pixel zunehmend.

Focal Length	fc = [457.66180 457.79589] ± [0.12117 0.12124]
Principal point	cc = [319.03535 242.03673] ± [0.15528 0.13110]
Distortion	kc = [-0.02219 -0.02548 0.00079 -0.00079 0.00000] ± [0.00065 0.00119 0.00008 0.00009 0.00000]
Pixel error	[0.12846 0.16078]

Tabelle 2: Kalibrierungsergebnisse des Videomodus in Matlab mit ihren Unsicherheiten

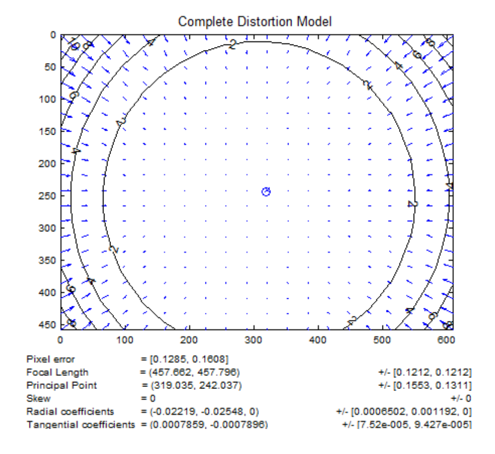


Abbildung 15: Darstellung der Gesamtverzeichnung im Videomodus

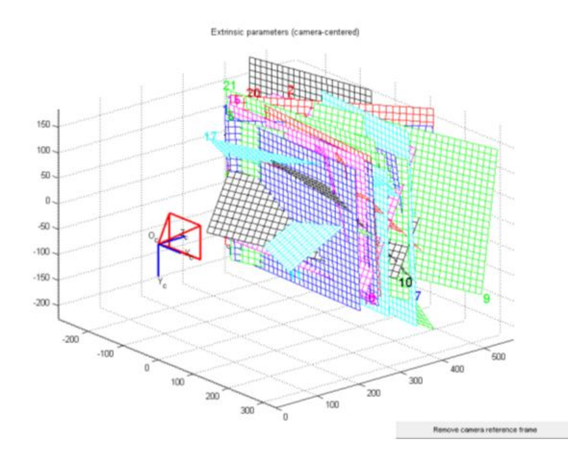


Abbildung 16: Aufnahmekonfiguration der Kalibrierung bezogen auf das Kamerazentrum

Wichtig für die Prozessierung der Bilder ist, dass die ermittelte Verzeichnungskorrektur auf Bilder angewendet werden kann, und diese als korrigierte Bilder abgespeichert werden können. Hierfür sind die Bilder, die mit der gleichen Aufnahmekonfiguration wie die Kalibrierungsbilder gemacht wurden, einzeln zu laden und können entweder im Farb- oder im schwarz-weiss Modus korrigiert werden. In Abbildung 17 ist links ein Originalbild der Kalibrierung, sowie rechts das verzeichnungskorrigierte Pendant dargestellt. Während im Original die Tonnenform an den Rändern gut zu sehen ist, fällt im verzeichniskorrigierten Bild die Geradlinigkeit auf. Im Vergleich gut erkennbar ist auch der kleinere Bildbereich im korrigierten Bild, der aus der pixelweisen Verschiebung des Bildinhalts nach Aussen resultiert, mit den in der Grafik in Abbildung 15 dargestellten Grössenordnungen. Anzumerken ist, dass die Bilder zu ihrer Prozessierung im gleichen Verzeichnis wie die Toolbox vorhanden sein müssen. Dort werden auch die korrigierten Bilder abgespeichert. Ausserdem ist zu beachten, dass die Kalibrierung und Verzeichnungskorrektur von hochaufgelösten Farbbildern viel Speicherplatz benötigt. Sie konnten nur auf einem 64-Bit-Windows 7 System durchgeführt werden, während die Kalibrierung für den Videomodus auch auf einem 32-Bit-System möglich war.

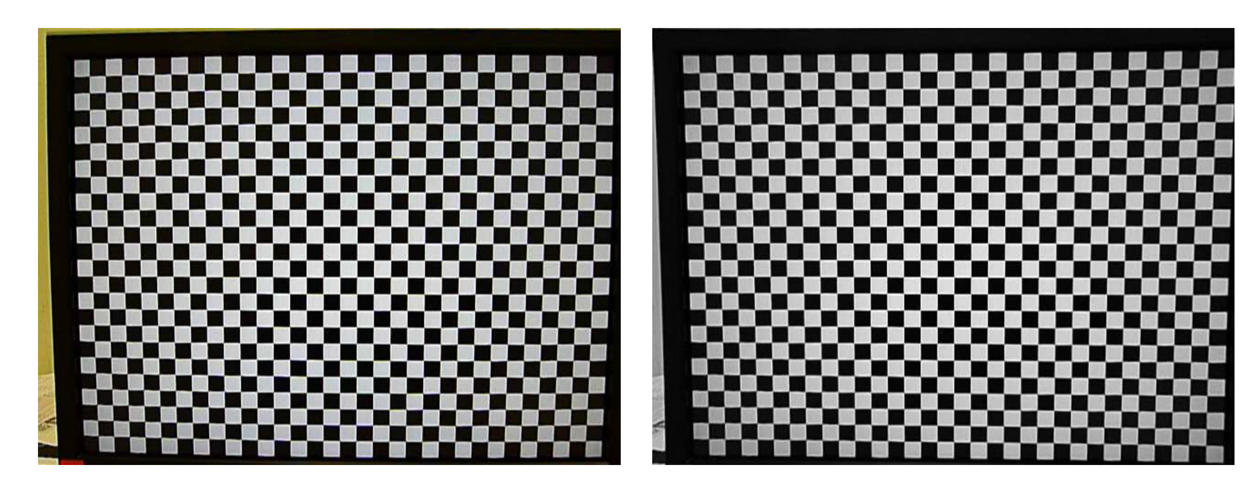


Abbildung 17: Gegenüberstellung von Originalbild (li.) und verzeichnungskorrigiertem Bild (re.)

5 Methoden zur automatischen Featurepunktbestimmung und Matching

In der Photogrammetrie und der Computer Vision sind bereits viele Methoden und Algorithmen entwickelt worden, die eine automatische Bildprozessierung im Hinblick auf die Rekonstruktion der in den Bildern aufgenommenen Szenen und der Bestimmung von Kameraparametern ermöglichen. Gegenüber der manuellen Auswertung sind Ihre Ergebnisse leider nicht immer richtig und somit nicht zuverlässig. Um dieses Manko zu beseitigen werden statistische Verfahren zur Ausreisserdetektion verwendet. Im Folgenden sollen die Methoden, die in den verwendeten Programmen zum Einsatz kommen, kurz genannt und erläutert werden. Ausführlichere Beschreibungen finden sich in den jeweils angegebenen Quellen. Einen guten Gesamtüberblick über die Computer Vision und die dort verwendeten Algorithmen bietet das Lehrbuch von Szelinski (Szelinski, 2010)

5.1 SIFT – Scale Invariant Feature Transform

Der von David Lowe an der Universität von British Columbia entwickelte SIFT-Algorithmus ist masstabs- und rotationsunabhängig, wie auch gegenüber projektiven Verzerrungen im Zuge von Änderung des Aufnahmestandortes, Beleuchtungsunterschieden und Bildrauschen in Massen robust. (Lowe, 2004) Aufgrund seines Ansatzes der Filterung und Bearbeitung nach Bildpyramiden ist der Rechenaufwand minimiert und rechenaufwändige Schritte werden nur an Featurepunkten durchgeführt, die gewissen Eingangsanforderungen genügen. Somit eignet er sich gut für Rundumaufnahmebildserien von Objekten wie sie mit einem UAV gemacht werden, die Übersichtsaufnahmen und Detailaufnahmen enthalten.

Die Featuregenerierung lässt sich in vier Schritte unterteilen: scale space extrema detection, keypoint localisation, orientation assignment und keypoint description. Sie werden im folgenden zusammengefasst widergegeben, auf Grundlage der Veröffentlichung von Lowe. (Lowe, 2004)

Für den ersten Schritt, der scale space extrema detection, wird zunächst eine Bildpyramidenberechnung durchgeführt. Anschliessend wird eine Gaussfilterung, die im Prinzip eine Tiefpassfilterung ist, mit festgelegten, unterschiedlichen Standardabweichungen bei den einzelnen Bildpyramidenbildern berechnet. Abbildung 18 deutet die Bildung der unterschiedlichen Stufen an. Je grösser die Standardabweichung σ ist, desto mehr werden Details in den Bildern unterdrückt. Die Filterung stellt quasi die Betrachtung des Bildes aus unterschiedlichen Distanzen dar. Wird ein Objekt von weit weg aufgenommen, so sind wenige Details im Bild erkennbar, wird es dagegen von nahem aufgenommen, so ist das Bild detailreich. Difference of Gaussian (DOG), bezeichnet die Bildung von Differenzen benachbarter Filterungen. Die anschliessende local extrema detection, erfolgt mittels Vergleich eines Pixels, wie er exemplarisch in Abbildung 19 dargestellt wird. Der Grauwert des Pixels wird innerhalb einer 3x3 Region mit den 26 umliegenden Nachbarpixeln im aktuellen (8 Nachbarn) und benachbarten Skalenraum (2 x 9 Nachbarn) verglichen. Hierdurch können lokale Maxima und Minima erkannt werden. Die scale space extrema detection bewirkt die Massstabsunabhängigkeit des Detektors.

Den zweiten Schritt, keypoint localisation, bestehen nur Punkte, an denen sich das zu prüfende Pixel von allen 26 Umliegenden unterscheidet, indem es relativ den grössten oder kleinsten Grauwert besitzt. Um die Qualität der Featurepunkte weiter zu verbessern, werden in einem späteren Schritt

kontrastarme Features und solche entlang von Kanten, die sich in Kantenrichtung nicht eindeutig zuordnen lassen, eliminiert.

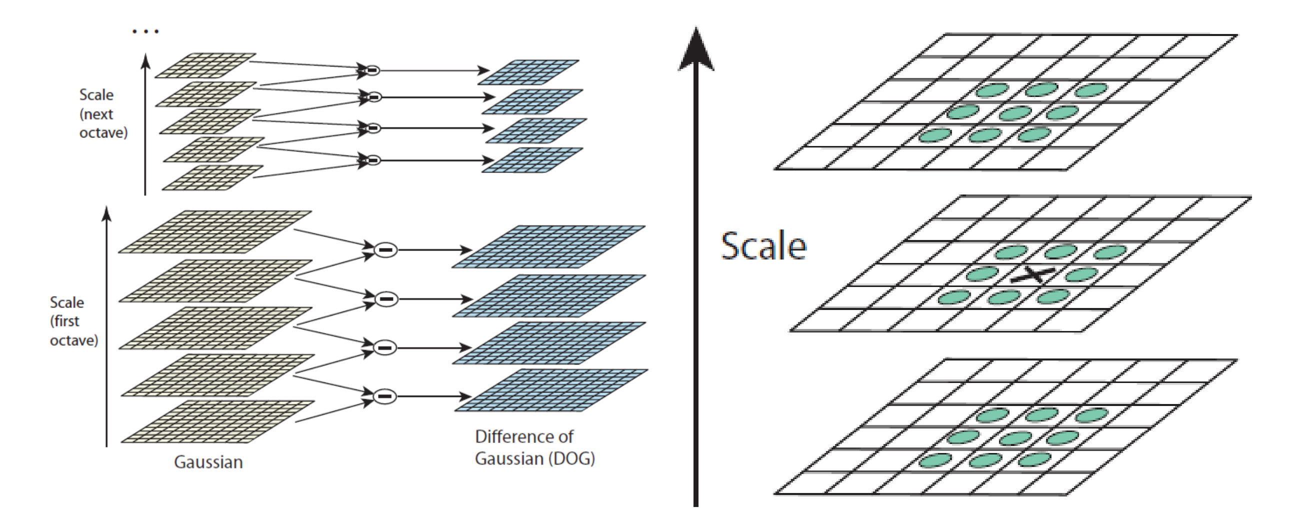


Abbildung 18: DOG-Bildung in unterschiedlichen Bildpyramidenstufen (Lowe, 2004, S. 6)

Abbildung 19: Pixelvergleich im aktuellen und benachbarten Skalenraum der DOG-Filterung (Lowe, 2004, S. 7)

Im dritten Schritt, dem orientation asignment, werden die Gradienten mit ihren Orientierungen für die einzelnen Featurepunkte berechnet. Die Orientierungen der Gradienten in der Region um den Featurepunkt herum werden in einem 36 Spalten umfassenden Histogramm eingetragen (10 Grad pro Spalte), gewichtet nach ihrer Gradientenlänge und dem Abstand zum Featurepunkt. Der Eintrag mit der grössten Länge sowie alle weiteren Einträge, die mindestens 80 % dieser Länge besitzen, werden als Keypoints zu dem einen Featurepunkt generiert. Die Rotationsunabhängigkeit und Massstabsunabhängigkeit wird hierbei erzeugt, indem alle Einträge relativ zur Orientierung und zum Massstab des Eintrags mit der grössten Länge erfolgen.

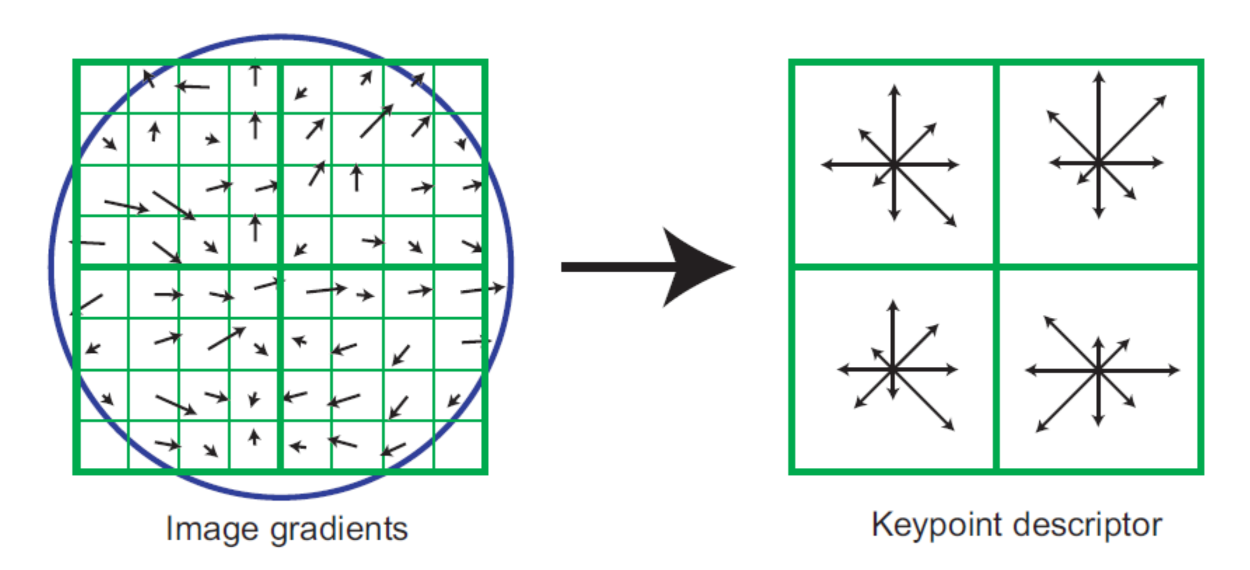


Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung eines keypoint descriptors auf Grundlage eines Gradientenbildes (Lowe, 2004, S. 15)

Im vierten Schritt, dem keypoint descriptor, wird der Deskriptor des Featurepunktes erstellt. Es wird ähnlich vorgegangen wie beim orientation asignment. Der Deskriptor stellt eine Matrix dar, die die Werte der orientierten Histogrammeinträge enthält. In 4x4 Subregionen um den Featurepunkt

werden die Gradienten und Orientierungen berechnet. Anstatt der vorher 36 Spalten stehen diesmal aber nur 8 Spalten für die Eintragung der Richtungen zur Verfügung (45 Grad pro Spalte). Weitere Normalisierungen und Modifizierungen des Deskriptors machen ihn gegenüber Belichtungsunterschieden robuster. In Abbildung 20 ist rechts beispielhaft ein auf 2x2x8-reduzierter Deskriptor dargestellt, während in Wirklichkeit eine 4x4x8-Matrix, also ein 128 Einträge umfassender Deskriptor von SIFT erstellt wird. Links sind die Gradienten der einzelnen Pixel zu sehen. Der blaue Kreis soll die verwendete Gauss- und Abstandsgewichtung bei der Gradientenberechnung darstellen.

Für das Matching zwischen den Bildern werden die Featurepunkte der Bilder untereinander anhand ihrer Deskriptoren verglichen. Gestartet wird mit dem Bild das die meisten Featurepunkte enthält und einem zweiten, das ähnliche Featurpunkte aufweist und eine gute Geometrie zwischen den Bildern ergibt. Hieraus wird die relative Orientierung des Bildpaares bestimmt. Die Featurepunkte eines dritten Bildes werden individuell gegen das erste Bildpaar verglichen und bei Übereinstimmung von mindestens 20 Punkten eine Bündelausgleichung berechnet, um das dritte Bild zu orientieren. Die weiteren Bilder werden sukzessiv eingeführt. Zur Beschleunigung des Prozesses wird nicht immer nur ein Bild hinzugenommen, sondern alle Bilder, deren Featurepunkte mit mindestens 75 Prozent der bereits im Rahmen der Bündelausgleichung verwendeten Featurepunkte übereinstimmen. Anschliessend wird erneut eine Bündelblockausgleichung berechnet. Steht eine Datenbank mit Samples zur Verfügung, so kann auch ein Matching gegenüber der Datenbank durchgeführt werden. Eine Validierung des Matchings kann auf Grundlage der Euklidischen Distanz unter den Featurevektoren durchgeführt werden. Basis hierfür bildet der Nearest-Neighbor Algorithmus, ergänzt durch einen Vergleich der Ähnlichkeit des besten Matchingpartners zum zweitbesten Matchingpartner. Ein Verhältnis der beiden potentiellen Matchingpartner von über 0.8 bedeutet, dass die beiden Matchingpartner sehr ähnlich sind. Um ein falsches Matching zu reduzieren, wird der Featurepunkt deshalb weder mit dem einen noch mit dem anderen Matchingpartner verknüpft. In einem von Lowe durchgeführten Experiment, dessen Matchingresultate in Abbildung 21 ersichtlich sind, zeigt sich, dass bei einem Signifikanzwert von 0.8 die Eliminierung von Matchingfehlern 90 Prozent beträgt, während nur 5 Prozent richtiger Verknüpfungen fälschlicherweise nicht weiterverwendet werden. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) des Matchings eines 40000 Keypoints umfassenden Projekts als Vergleich der relativen Distanzen zwischen nächstem (closest) Nachbarn und zweitnächstem (next closest) Nachbarn, die als Synonym für bester und zweitbester Matchingpartner stehen. Deutlich wird, dass ab dem Ähnlichkeitsverhältnisses von 0,8 das fehlerhafte Matching sprunghaft zunimmt.

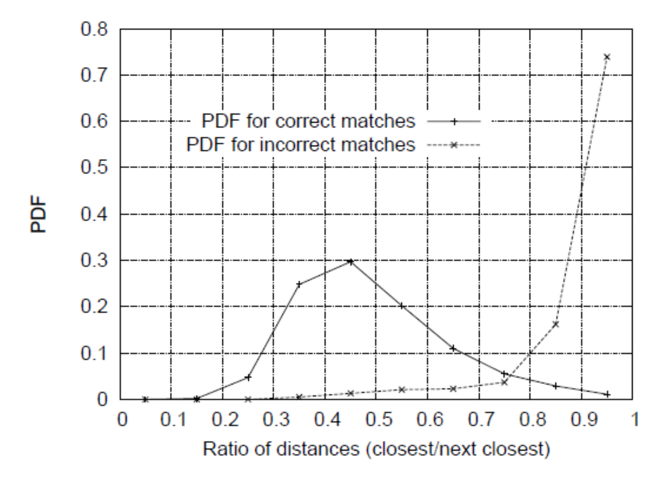


Abbildung 21: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Matchings eines 40000 Keypoints umfassenden Projekts. (Lowe, 2004)

Der Deskriptor ist also die Beschreibung eines Featurepunktes, besitzt hierbei aber keine Eindeutigkeit, da ansonsten eine Robustheit gegenüber Belichtungsunterschieden und Verzerrungen nicht gegeben wäre. Damit die Featurepunkte zwischen den Bildern möglichst gut zueinander gematcht werden und Fehlzuordnungen reduziert werden, wird wie oben beschrieben nach dem Nearest Neighbor Verfahren gearbeitet.

5.2 Patch-Based Multi-View Stereo (PMVS)

PMVS ist ein Programm, das von Yasutaka Furukawa an der Universität von Washington entwickelt wurde, um aus orientierten Bildverbänden automatisch eine Rekonstruktion des Objekts bzw. der Szene als 3D-Punktwolke zu erstellen. Es baut auf der Methode des Multi View Stereo auf, was bedeutet, dass ein Objekt aus mehreren Bildern rekonstruiert wird.

Der Ablauf wird im Folgenden zusammengefasst widergegeben. Grundlage bilden das PMVS beschreibende Paper (Furukawa, Documentation of Patch-Based Multi-View Stereo Software (PMVS), 2007), sowie eine vom Entwickler gehaltenen Präsentation (Furukawa, PMVS-Documentation, 2010).

PMVS führt für die Objektrekonstruktion die Schritte Featurepunkterkennung im Modul Affine und Matching im Modul Match aus. Anschliessend wird in den featurepunktlosen Räumen versucht, durch Expansion der bestehenden Punkte mit Patches, das Modell zu verdichten. Diese Verdichtung wird mit einer Filterung zur lokalen photometrischen Konsistenz[7] der Punkte und zur Geometrie der Sichtbarkeit überprüft. Die Featurepunkterkennung basiert auf zwei Detektionsfiltern, dem Harris Corner Detektor (HCD) und dem Difference of Gaussian (DOG) Detektor (vgl. 5.1). Abbildung 22 zeigt beispielhaft Featurepunkte die mit den beiden Methoden in zwei leicht zueinander versetzen Aufnahmen extrahiert wurden. Punkte, die mit HCD gefunden wurden, sind rot dargestellt, DOG basierte Featurepunkte sind blau eingefärbt. Es fällt auf, dass im auch für das Auge einheitlich wirkenden Bildbereichen mit DOG viele Featurepunkte gefunden werden, während HCD vor allem an Stellen mit starken punktuellen Kontrasten Featurepunkte setzt. Mit Hilfe von Epipolarlinien werden die Featurepunkte zwischen den Bildern gematcht, wie in Abbildung 25 dargestellt. Potentielle Kandidaten müssen sich in einem Abstand von max. 2 Pixeln zur Epipolarlinie befinden. Die Featurepunkte eines Bildes werden mit allen Kandidaten aus den anderen Bildern in den 3D-Raum mittels Rückprojektion projiziert. Aus den unterschiedlichen 3D-Punkten zu einem Featurepunkt wird nur derjenige weiterverwendet, der auf Grund seiner relativen Lage zum Bildzentrum als richtig angesehen werden kann und die Anforderungen an die photometrische Konsistenz erfüllt. Die anderen werden verworfen. Die ausgewählten 3D-Punkte dieses ersten Matching-Schrittes werden als Patches bezeichnet und bilden die Keimzellen für die anschliessende Expansion. Sie sind, wie in Abbildung 23 zu sehen, definiert über ihre Position (position), Ausdehnung (extent) und die Ausrichtung ihrer Normalen (normal). Die Expansion setzt sich aus vier Schritten zusammen, und ist in Abbildung 26, von links oben nach rechts unten verlaufend, dargestellt und im Folgenden beschrieben. Zunächst wird überprüft, wie links oben dargestellt, ob ein Patch, im Bildraum von direkten Nachbarn umgeben ist. Ist dies der Fall, so wird nicht weiter verdichtet. Sind wie rechts oben, jedoch Zellen unbesetzt (rot eingefärbt), so ist Verdichtungspotential vorhanden. Hierfür wird, wie links unten dargestellt, die Tangente des bestehenden Patches p mit dem aus der freien Zelle durchs Objektivzentrum rückprojezierten Strahl geschnitten. Die Ausrichtung n(q) und Informationen

[7] Die Definition von photometrischer Konsistenz ist nicht ersichtlich. Es wird jedoch vermutet, dass es sich hierbei um die Farbeigenschaften eines Bereichs handelt, die bei der Filterung bildübergreifend verglichen werden.

zur Sichtbarkeit V(q) des hieraus neu entstanden Patches q wird zunächst vom Ausgangspatch p übernommen. Die Verifizierung des neuen Patches q erfolgt unter Verwendung weiterer Bilder, wie rechts unten dargestellt. Sie ist gegebenenfalls mit einer Korrektur der Lage und Ausrichtung verbunden. Der beschriebene Prozess wird durchgeführt bis alle Patches ihn durchlaufen haben. An die Expansion anschliessend wird eine Filterung der Patches durchgeführt. Hier wird sowohl die Sichtbarkeit der Patches als Prüfungskriterium verwendet, als auch die Entfernungsinformationen einer Depth-Map berücksichtigt. Die Filterung ist in Abbildung 24 dargestellt.

Die Abfolge Expandieren und Filtern wird mehrmals hintereinander durchgeführt, wobei die Filterschwellen immer mehr herabgesetzt werden.





Abbildung 22: Featurepunkte erstellt mit HCD (rot) und DoG (blau) (Furukawa, Patch-based MVS and its Applications, 2010).

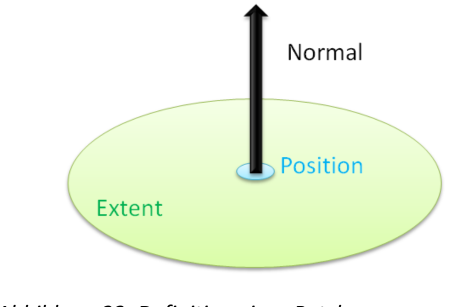


Abbildung 23: Definition eines Patch

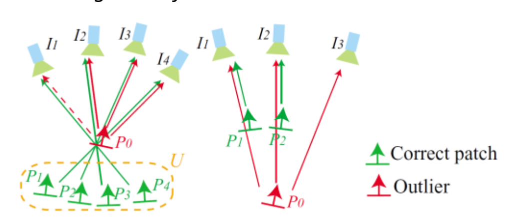


Abbildung 24: Filterung aufgrund Sichtbarkeits- und Entfernungskriterien (Furukawa, PMVS-Documentation, 2010)

Abbildung 25: Finden von Matchingkandidaten anhand Epipolarlinie

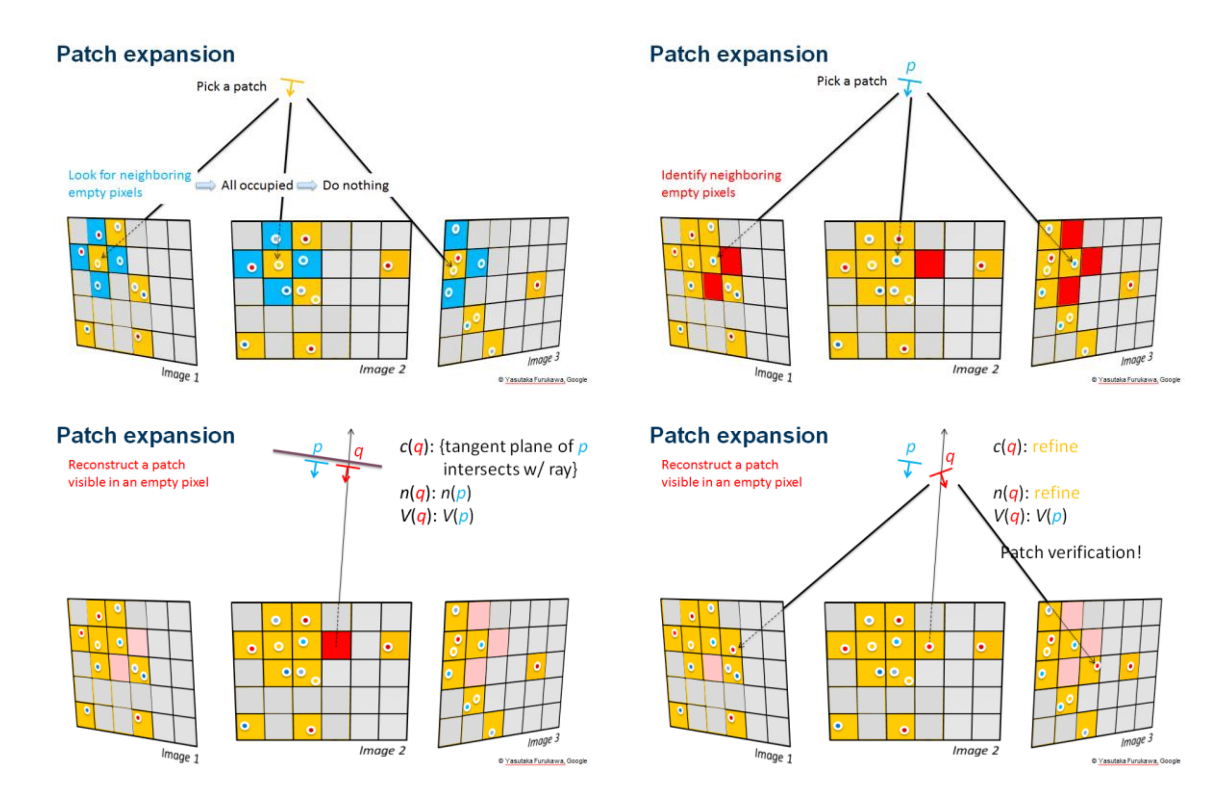


Abbildung 26: Vier Schritte des Dense-Matching mit PMVS. (Furukawa, PMVS-Documentation, 2010)

In PMVS kann der Benutzer die Dichte angeben, mit der Featurepunkte, falls vorhanden, über das Bild verteilt detektiert werden sollen. Im matching Modul kann die Dichte des Dense-Matching eingestellt werden, also innerhalb welcher Pixelregion oder Fenstergrösse mindestens ein Punkt mittels Rückprojektion aus den Bildebenen erstellt werden soll. Des Weiteren kann die Zuverlässigkeit dieser Rückprojektion und die Fenstergrösse des für die Projektion erforderlichen Pixelvergleichs angegeben werden, wie auch die minimale Anzahl der Bilder, aus denen die Rückprojektion erfolgen soll, festlegbar ist. Für die Stabilität der Geometrie ist eine Anzahl von drei Bildern besser als die Minimalanforderung von zwei Bildern. Je grösser der Rahmen des Pixelvergleichs gewählt wird, desto geringer sind fehlerhafte Matches (vgl. Tabelle 3, 7.2.3). (Furukawa, Documentation of Patch-Based Multi-View Stereo Software (PMVS), 2007)

Fehlerhafte Matches zeigen sich in Form von vor oder hinter dem eigentlichen Objekt befindlichen flächenhaften Pixeln und fehlerhaft eingefärbten Pixeln entlang von Kanten. Sie treten meist in schlecht texturierten Bereichen, oder in Bereichen mit sich wiederholenden Mustern auf, wo nur wenige, oder falsch gematchte Featurepunkte zu finden sind. Die Ursache für die falsche, flächenhafte Positionierung der Pixel liegt vermutlich in einer schlechten Orientierung der Bilder zueinander. Diese führt zu einer Interpolation zwischen örtlich falschen Featurepunkten. Bei der Vorgehensweise „Match, Expand and Filter“ wird die Expansion nicht als fehlerhaft erkannt, da die falschen Featurepunkte einen Cluster bilden, und räumlich zusammenliegen. Dass dieser Fehler in der Filterung nicht bemerkt wird, liegt wohl daran, dass die Gewichtung von lokaler Konsistenz im Patch gegenüber den Sichtbarkeituntersuchungen zwischen den Bildern zu hoch ist. Wird die Zuverlässigkeit der erstellten Featurepunkte hinaufgesetzt, so sinkt nämlich die Dichte der rekonstruierten Punktwolke, aber auch die Anzahl fehlerhafter Patches.

Das Programmpaket Photosynth Toolkit beinhaltet die Software PMVS und führt die in den Photosynths ermittelten Kamerapositionen als Werte für die benötigten Bildorientierungen ein.

5.3 Bundler

Das Programm Bundler ist im Rahmen des Forschungsprojekts Photo Tourism von Noah Snavely an der Universität von Washington entwickelt worden. Es ist ein auf der Methode Multi-View-Stereo (MVS) bestehendes System, das aus einer Bildsammlung einer Szene oder eines Objektes eine 3D-Rekonstruktion der Kameraparameter und Objektgeometrie erstellt. Es bedient sich hierbei teilweise bestehender Methoden und Programme und geht Schritt für Schritt, inkrementell Bilder hinzufügend, vor. Wichtige Komponenten sind unter anderen die Featurepunktdetektion auf Grundlage des SIFT-Detektors (vgl. 5.1), die Nearest Neighbor Methode zum Verbessern des Matchings und das RANSAC-Verfahrens (Random Sample Consensus) als stochastisches Verfahren zur Bestimmung von Ausreissern. Grundlegender Prozess für die Optimierung der 3D-Punkte ist ein leicht modifizierter Algorithmus einer Bündelblockausgleichung, namens SBA (sparse bundle adjustment). Dieser Algorithmus nutzt die Tatsache aus, dass aufgrund der häufig unabhängigen Parametergruppen die Jacobi-Matrix oft nur spärlich besetzt ist. Dadurch, dass die unbesetzten Matrizenbereiche bei der Bündelblockausgleichung nicht genutzt werden, wird die benötigte Rechenkapazität und Zeit minimiert (Loukaris & Argyros, 2009). Detaillierte Angaben zu Bundler und den genannten Komponenten können zusammengefasst der Arbeit von Thomas Knabl (Knabl, 2009, S. 6 ff.), bzw. der Publikation des Entwicklers Noah Snavely (Snavely, Seitz, & Szeliski, 2006) entnommen werden.

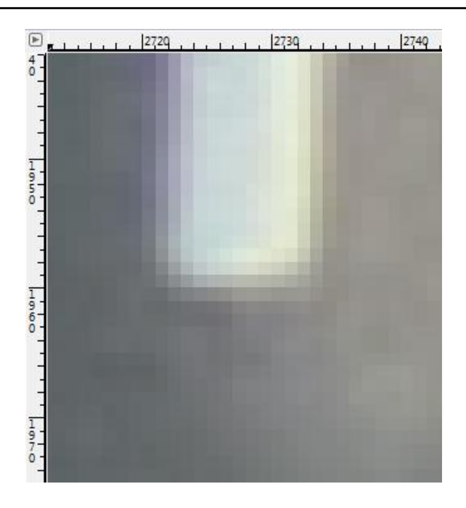
6 Bildverarbeitung – Bundler Variante

Die Bildverarbeitung wurde bei dieser Variante mit dem auf dem Computer zu installierten Programm Bundler Version 0.3 durchgeführt. Bundler ist für eine Linuxumgebung erstellt und wird deshalb unter dem Kompatibilitätsprogramm Cygwin ausgeführt. Mit Cygwin lassen sich Programme, die üblicherweise auf POSIX-Systemen wie Linux laufen, auf Microsoft Windows portieren. (Cygwin - Wikipedia, 2010).

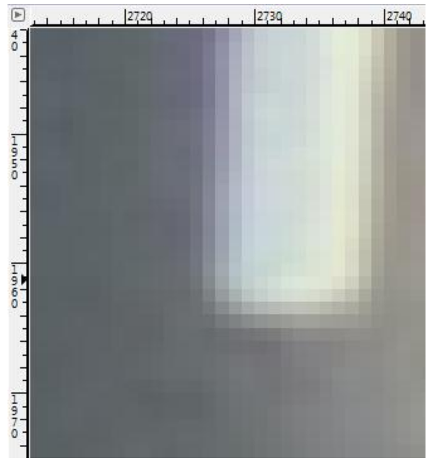
6.1 Vorgehensweise Bundler

Bundler liest als Näherung für die Brennweitenbestimmung den Exif-Eintrag der verwendeten Bilder. Bei aus Videoaufnahmen erstellten Einzelbildern ist deshalb die Ergänzung der Exif-Daten nötig. Die Kamera muss mit Hersteller und Typ eingetragen werden, Fokuslänge und Resolution müssen, wie unter 4.2 beschrieben, ergänzt werden. Des weiteren ist es nötig, die Datei extract_focal.pl im bin-Ordner mit dem Kameramodell und den Sensorwerten zu ergänzen. Durch Ausführen der Datei RunBundler.sh in Cygwin, beginnt Bundler die Bilder nacheinander einzulesen und die benötigten Exif-Daten bei vorhandener Eintragung der Kamera in der Datei extract_focal.pl richtig auszulesen, bzw. umzurechnen. Anzumerken ist, dass ohne die Ergänzung der extract_focal.pl-Datei, Bundler keine ordentlichen Ergebnisse liefert.

Das Programm sucht nach den unter 5.3 beschriebenen Methoden Featurepunkte in sämtlichen Bildern und versucht diese zu matchen. Die Bearbeitung dauert hierbei je nach Anzahl der Bilder, und Auflösung unterschiedlich lang. Die maximale Bildgrösse sollte 1800 x 1800 Pixel nicht überschreiten, wegen einer Beschränkung im verwendeten SIFT-Detektor (Knabl, 2009, S. 24). Die erstellten Dateien werden in den neu erstellten Ordner *Bundle* geschrieben. Hierbei stellen die PLY-Files, die Punktwolken der gematchten Featurepunkte dar. Die OUT-Datei ist das Protokoll von Bundler und zeigt unter anderem die während der Bearbeitung durchgeführten Zwischenschritte des Matchings, der Bündelblockausgleichung und am Dateianfang die berechneten Brennweiten samt Verzeichnungsparametern. Die Kameraparameter werden in einer Autokalibration während der Bündelblockausgleichung berechnet. Ihre Formatierung entspricht der von Photosynth, wie in Tabelle 4 dargestellt. Im Ordner *Visualize* sind die, auf Grundlage der Kameraparameter um die radiale Verzeichnung korrigierten Bilder, enthalten. Im Aussenraum der Bilder sind, wie in Abbildung 27 dargestellt, z.B. Pixelverschiebungen bei den hochaufgelösten Bildern (3648 x 2736 Pixel) von bis zu 10 Pixeln am Bildrand auszumachen, bei den Bildern im Videomodus (640 x 480 Pixel) betragen die Verschiebungen dementsprechend 1-2 Pixel.



Bildausschnitt der Originalaufnahme



verzeichnungskorrigierter Bildausschnitt

Abbildung 27: Pixelverschiebung durch Verzeichnungskorrektur im Aussenbereich eines hochaufgelösten Bildes

Die von mir mit Bundler durchgeführten Bildverarbeitungen ergaben mit den von mir erstellten Datensätzen keine ansehnlichen Ergebnisse. Der Grund hierfür liegt in der nicht durchgeführten Ergänzung der extract_focal.pl-Datei, was zu spät erkannt wurde. Einzig beim dem im Programm enthaltenen Datensatz Kermit, der 11 Bilder eines Stofftieres in einer mit viel Textur versehenen Szene zeigt, war deshalb eine Rekonstruktion der Kamerapositionen möglich. Die selbst aufgenommenen Objekte, mittels Befliegungen oder Handaufnahmen, wurden wegen der unvollständigen Kameradatei nicht in einer zusammenhängenden Punktwolke rekonstruiert, sondern bildeten Cluster. In diesen Cluster sind teilweise Szenen aus den Bildern zu erkennen. Teilweise bestehen sie aber nur aus wenigen Punkten und lassen keinen Bildausschnitt erkennen. Die PLY-Dateien mit der niedrigsten Ordnungszahl, die immer die Featurepunkte des ersten Bildpaarmatchings enthalten, zeigen immer eine ordentliche Punktgeometrie. In PLY-Dateien späterer Matchingschritte sind teilweise jedoch die Kamerapositionen an falschen Stellen um die Punktwolke herum verteilt. Hieraus folgere ich, dass das Matching zwischen mehreren Bildern nicht richtig funktioniert. Sowohl bei kleinen Zwischenwinkeln, wie in einem beschränkten Datensatz der Videobefliegung des HXE (Flug0511_VGA_Dach191_210), als auch bei wenigen Datensätzen mit wenigen Einzelbildern mit grösseren Zwischenwinkeln (Physik) sind fehlerhaft rekonstruierte Kamerapositionen auszumachen. Mit diesen Positionen kann der Schritt zum Dense-Matching nicht erfolgen.

Bundler gelingt aus dem Kermit-Datensatz die Rekonstruktion der Kamerapositionen von neun aus elf eingeführten Bildern, die in Abbildung 28 dargestellt sind. (Datensatz: Kermit_Bundler, bzw. Photosynth: Kermit_ori_ohne_4_6)

Die beiden rot umrandeten Bilder werden von Bundler nicht in die gemeinsame Ausgleichung hineingenommen. Die grössere Blickwinkeländerung der beiden gegenüber den restlichen Bildern ist ersichtlich und Ursache für das misslungene Matching. Für die übrigen, nicht umrandeten neun Bilder werden die richtigen Kamerapositionen und eine geometrisch richtige Featurepunktwolke berechnet. In Abbildung 29 ist eine aus Bundler-Zwischenergebnissen zusammengesetzte Punktwolke zu sehen. Die grüngelben, bzw. rotgelben Doppelpixel, kettenartig aneinandergereiht, stellen die sich verändernden Kamerapositionen der iterativen Bündelblockausgleichung dar.



Abbildung 28: Bilder des Datensatzes Kermit, rot umrandet, die von Bundler nicht zuordbaren Bilder.

594 gematchte Featurepunkte



Bundler-Methode: 36718 Pkte.

Photosynth-Toolkit: 39540 Pkte.

Abbildung 29: Aus Bundler-Zwischenergebnissen zusammengesetzte Punktwolke.

Abbildung 30: Mit PMVS dichtgematchte Punktwolken unterschiedlicher Methoden

Aufgrund der Probleme bei der Rekonstruktion der Kamerapositionen in den selbsterstellten Datensätzen sowie erst zum Schluss der Arbeit überwundener Problemen bei der Übergabe der Bundlerergebnisse an PMVS, zur Generierung einer mittels Dense-Matching dichten Punktwolke, ist nur der Kermit Datensatz auf diese Art prozessiert. In Abbildung 30 ist links die resultierende Punktwolke der Bundler-Methode dargestellt. Offensichtlich werden die Lücken in texturlosen Bereichen, wie dem ins Buch eingesteckten weissen Papier gegenüber gut rekonstruierten Bereichen, wie den Buchumschlägen, wo diese eine gute Textur besitzen. Das Rauschen in der 3D-Punktwolke in den gut texturierten Bereichen ist gering. Die Ränder von Objekten, vor allem diejenige Ränder die zum offenen Raum hin liegen, sind jedoch ausgefranst und haben die Farbe des Hintergrunds. Hier sind meines Erachtens Ungenauigkeiten in der Bildgeometrie ausschlaggebend, die sich im Matching fortsetzen und es negativ beeinträchtigen. Rechts ist zum Vergleich die Punktwolke des gleichen Datensatzes mit den gleichen PMVS-Parametern aus der Prozessierung mit der Photosynth-Toolkit-Variante zu sehen. Die beiden Modelle sind optisch von der Detailierung ziemlich identisch, ihre Punktanzahl ist leicht unterschiedlich mit ca. 7 % mehr Punkten in der Photosynth-Prozessierung.

6.2 Fazit Bundler

Als Fazit zu Bundler ist anzumerken, dass mit dem Programm offensichtlich eine 3D-Rekonstruktion aus Bildern möglich ist, deren Ergebnisse mit denen von Photosynth gleichgesetzt werden können. Dass die Bearbeitung von mir nur bedingt durchgeführt werden konnte, ist meiner Hardware und mangelndem Wissen zur Arbeit mit Konsolenbefehlen zuzuschreiben. Ein Vorteil des Programms ist sicherlich die Ausführbarkeit auf dem eignen Rechner, die zur Datensicherheit führt und Offline betrieben werden kann. Die Steuerung des Programms über Konsolenbefehle, sowie die Verwendung von Cygwin um die Kompatibilität der grösstenteils für Linux geschriebenen Programmteile zu

ermöglichen, ist jedoch für ungeübte Windows-Nutzer gewöhnungsbedürftig. Die Übergabe von Bundler zu PMVS war mit dem von mir betriebenen 32-Bit-Windows 7-System nicht durchführbar. Obwohl es laut Recherchen eine auf 32-Bit kompilierte Version von PMVS gibt, die ich hierfür versuchte einzusetzen, konnten die Bundlerorientierungen nur auf einem 64-Bit-System zum erfolgreichen Dense-Matching mit PMVS verwendet werden. Für zukünftige Bearbeitung mit Bundler sollte die Ausführung auf einem Rechner mit einem Linux-, oder einem 64-Bit-Windows 7-Betriebssystem durchgeführt werden. Der Vergleich von Daten, die mit Bundler und mit Photosynth prozessiert wurden, zeigt, dass von der Datenstruktur hin zu den Ergebnissen grosse Übereinstimmung herrscht. Bundler scheint also die grundlegende Basis für Photosynth darzustellen. In der Prozessierungsgeschwindigkeit ist Bundler, abhängig von der Rechenleistung des Systems und Bandbreite der Internetverbindung, bei der mir zur Verfügung stehenden Hardware jedoch Photosynth unterlegen.

7 Bildverarbeitung – Photosynth-Toolkit Variante

Das Literaturstudium und die Onlinerecherche haben mich auf das Programm Photosynth von Microsoft aufmerksam werden lassen. Es handelt sich hierbei um einen Webservice, der vom Benutzer hochgeladene Bilder selbstständig zu Panoramabildern oder Bildsammlungen mit Ihrer relativen Orientierung zusammensetzt. Bei geeigneten Bildern ist, wie in Abbildung 31 rechts zu sehen, eine aus gematchten Featurepunkten erstellte 3D-Punktwolken verfügbar. Links sind die relativen Kameraaufnahmepositionen der Bilder erkennbar. Hier setzt das zweite Programm der Variante, Photosynth-Toolkit, an. Es nutzt die berechneten Kamerapositionen und –parameter, um zusammen mit den Originalbildern der Aufnahme eine dichte 3D-Rekostruktion basierend auf PMVS zu erstellen.

7.1 Photosynth

Grundlage von Photosynth bildet das Forschungsprojekt „Photo Tourism“ der Universität von Washington, in dessen Zuge das Programm Bundler, für die relative Orientierung von Bildsammlungen und die Darstellung dieser als 3D-Punktwolken, entwickelt wurde. Microsofts Engagement im Bereich der Online-Bildbearbeitung und -betrachtung ist als Teil einer gross angelegten Kampagne zu sehen, um Google, dem Marktführer des Internets und Eigentümer von Onlinediensten wie Google Maps, Picasa oder Streetview Konkurrenz zu machen. Durch neue bzw. verbesserte Produkte, wie Bing-Maps mit Ergänzung der Orthophotokarten durch Schrägaufnahmen, oder der Verlinkung zu georeferenzierten Photosynths, sollen Nutzer vermehrt Microsoft-Seiten und –Dienste nutzen. Die gesteigerte Zahl von Klicks auf diese Webseiten, führt zur Erhöhung der Werbeeinnahmen von Microsoft, da diese branchenüblich an die Popularität einer Webseite gekoppelt sind.

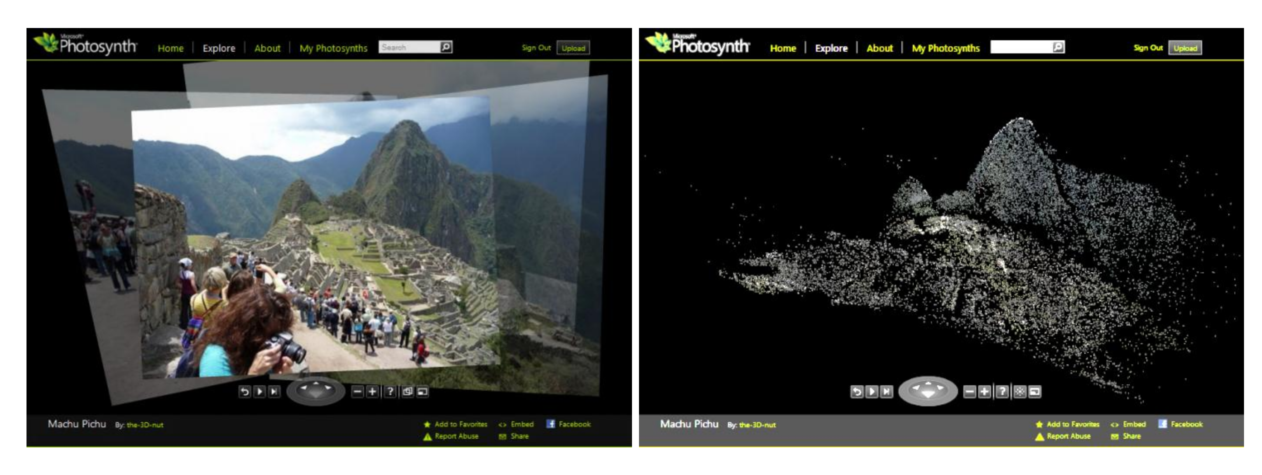


Abbildung 31: Photosynth-Darstellung von Machu Pichu: li.in orientierten Bildern, re. als 3D-Punktwolke[8]

7.1.1 Voraussetzungen für Photosynth

Um nicht nur Photosynths, was auch die Bezeichnung für das Resultat einer erfolgreichen Zusammenstellung einer Bildgalerie ist, des Webservice betrachten zu können, sondern eigene

[8] Quelle: http://photosynth.net/view.aspx?cid=b777e0ee-f9aa-4d19-941f-542b0b4b6f31, Stand: 25.01.2011

Photosynths erstellen zu können, ist zunächst eine Anmeldung bei Photosynth nötig. Im Anschluss stehen dem registrierten Benutzer 20 GB Online-Speicherplatz zur Verfügung die mit Panoramabildern und Photosynths gefüllt werden können. Das Programm zur Erstellung von Photosynths ist nur unter Betriebssystemen von Windows, ab Version XP und höher, lauffähig. Da Bilder grosse Datenmengen darstellen, ist die Verfügbarkeit eines Breitbandinternetanschlusses, sowie aussreichend Prozessorleistung (mindestens 2 GHz, Quad-Core ideal) und Speicherplatz (mindestens 256 MB, mehr als 1 GB empfehlenswert) des Computers bei der Verwendung essentiell. Da die Erstellung von Photosynths teilweise lokal auf dem Rechner passiert, muss ein Programmpaket installiert werden, das online zur Verfügung steht.

7.1.2 Zugrundeliegende Methoden

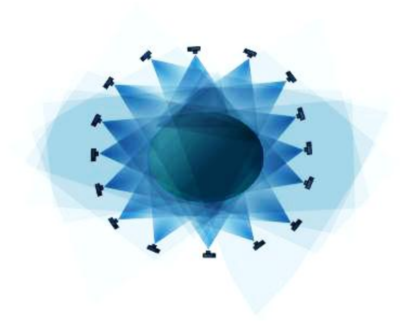
Die Photosynth zugrundliegenden Methoden bauen auf dem im Rahmen des Forschungsobjektes Photo Tourism entwickelten Programmen und Ansätzen auf. Für die Prozessierung der Bilder zu einem räumlichen Photosynth bildet Bundler die Basis, wie in 5.3 ausgeführt. Die schnelle und gut zu navigierende Bildbetrachtung auf der Homepage von Photosynth bildet die zweite wichtige Säule für eine kundenfreundliche Handhabung. Sie wird durch die Silverlight-Software gewährleistet, die von der Firma Seadragon entwickelt wurde und mittlerweile zu Microsoft gehört. Das Prinzip der Software ist dem von Flash ähnlich. Es wird immer nur der Teil eines oder mehrerer Bilder heruntergeladen, und dies auch nur in der benötigten Auflösung des Bildschirms, der gerade für den Nutzer auf dem Bildschirm dargestellt werden soll. Durch den Zusammenschluss der beiden Techniken können Bildsammlungen mit vielen Gigapixeln hochaufgelöster Bilder ohne zeitraubendes Warten wegen langsamen Bildaufbaus mit einem bis dahin nicht gekannten Raumgefühl betrachtet werden.

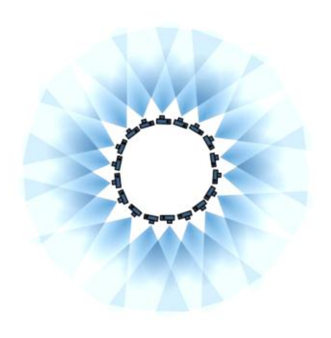
7.1.3 Vorgehensweise

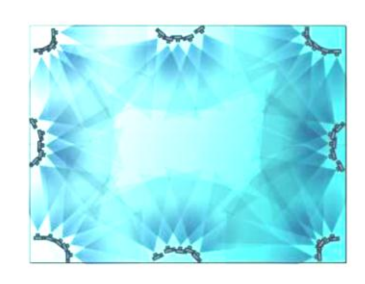
Damit Bilder für die Rekonstruktion einer 3D-Punktwolke dienen können, müssen bereits einige Dinge bei der Aufnahme beachtet werden.

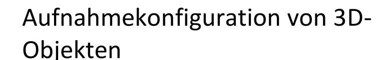
- Die Überlappung zwischen den Bildern sollte mindestens 50 % betragen.
- Um Bildpaare dreidimensional auswerten zu können müssen die Aufnahmen von unterschiedlichen Positionen erfolgen. Eine blosse Verschwenkung der Kamera vom gleichen Standpunkt aus dient nur der Erstellung von Panoramen, die aus Einzelbildern zusammengesetzt werden.
- Um der Punktwolke eine höhere Dichte zukommen zu lassen, ist das Aufnehmen von Details mittels Zoom oder Näherherantreten an das Objekt unerlässlich. Es ist darauf zu achten, dass die Detailbilder mit den Übersichtsbildern verknüpft werden können. Hierfür ist beim Verkürzen der Distanz zum Objekt zu beachten, dass mindestens bei der Verkürzung der Aufnahmedistanz um die Hälfte ein weiteres Bild des Objekts aufgenommen wird. Hierdurch wird gewährleistet, dass identische Punkte aufgrund grosser identischer Bereiche gefunden werden können.
- Wird ein Objekt bei der Aufnahme umrundet, so sollten ca. alle 15 Grad ein Bild gemacht werden. Der beschränkte Unterschied in den Aufnahmewinkeln ermöglicht im Allgemeinen noch das Auffinden identischer Punkte in benachbarten Bildern.
- Je mehr Bilder eines Objekts aus unterschiedlichen Positionen gemacht werden, desto besser ist die Geometrie der erstellten 3D-Punktwolke.

Im Benutzerhandbuch zur Erstellung guter Photosynths sind folgende Abbildungen zur leichten Erfassung der eben angesprochenen Punkte zu finden (Photosynth Microsoft).









Aufnahmekonfiguration von 3D-Objekten

Aufnahmekonfiguration für Innenräume, Teil 1: aus Zentrum

Aufnahmekonfiguration für Innenräume , Teil 2: von Seiten und aus Ecken

Abbildung 32: Aufnahmekonfigurationen um Bilder für gute Photosynths zu erstellen (Photosynth Microsoft)

Bei Aufnahmen im Videomodus wird die Überlappung aufeinanderfolgender Bilder ausschliesslich über die Zerlegungsrate in der Videonachbearbeitung festgelegt. Eine einheitliche Bewegungsgeschwindigkeit bei der Aufnahme bei translatorischen Bewegungen und eine angepasste Drehgeschwindigkeit bei Rotationen führen zu regelmässigen Überlappungen. Die Wahl der Flugbahn, um z.B. bei einer Gebäudebefliegung Fassaden- und Nadiraufnahmen gemeinsam prozessieren zu können, bedarf mitunter noch Zwischenbahnen mit Schrägaufnahmen in unterschiedlichen Winkeln. Das aus dem Benutzerhandbuch gegebene Beispiel zur Umrundung einer Gebäudeecke in Abbildung 33 ist auf den Übergang von Fassadenflächen zu Dachflächen zu transferieren. In dem Beispiel finden sich zwischen benachbarten Bildern viele Matches. Zwischen Bildern die 1 Bild auseinander sind, finden sich ausreichend Matches. Bei den dargestellten Bildern, die mehr als 2 Bilder auseinanderliegen, sind kaum noch Matches zu finden. (Photosynth Microsoft)



Abbildung 33: Beispiel für eine gute Aufnahmekonfiguration zur Umrundung einer Ecke (Photosynth Microsoft)

Sind die aufgenommenen Videos nach erstem Augenschein von guter Qualität, wobei Probleme in der Folge von Bewegungsunschärfe und Belichtungsunterschieden auftauchen können, so müssen sie wie unter 4.1 beschrieben, in Einzelbilder zerlegt werden. Anschliessend können die Bilder zur Erstellung eines neuen Photosynths verwendet werden. Hierfür müssen die Exif-Daten nicht nachbearbeitet werden.

Nach klicken des Menüpunkts *Upload*, der sich, wie in Abbildung 31 zu sehen, rechts oben befindet, öffnet sich ein neues Fenster bei dem das Icon *Create a new synth* geklickt werden muss. In dem sich öffnenden Fenster, dargestellt in Abbildung 34, können die hochzuladenden Bilder ausgewählt, und Einstellungen zur Privatsphäre gemacht werden. Sind in den Exif-Daten der Bilder Zusatzinformationen zur Lage, z.B. in Form von GPS-Koordinaten (vgl. 4.2), so können diese für das Geotaggen, die räumliche Zuordnung, des Photosynths genutzt werden. Eine Georeferenzierung der Punktwolke, z.B. in WGS-84 Koordinaten, erfolgt hierdurch aber nicht. Lediglich die Verlinkung des erstellten Photosynths auf der microsofteigenen, kartenbasierten Websuche[9] wird dadurch lagerichtig erstellt. Abbildung 35 zeigt eine solche Verlinkung im Luftbild zu einem geogetaggten Photoysynth des HXE-Gebäudes auf dem Hönggerberg.

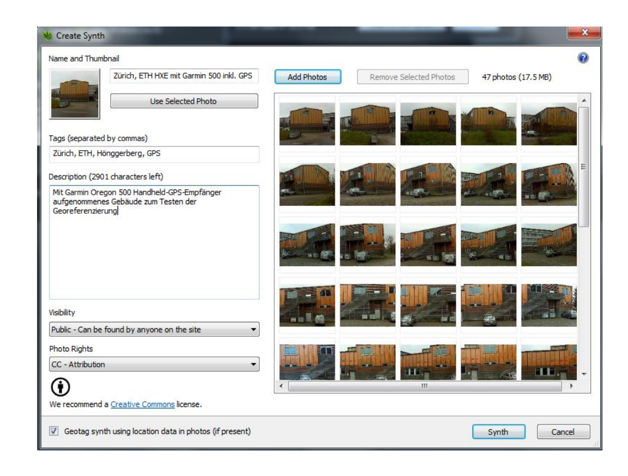


Abbildung 34: Eingabefenster zur Photosynth Erstellung mit Einstellmöglichkeit zu Privatsphäre und Georeferenzierung

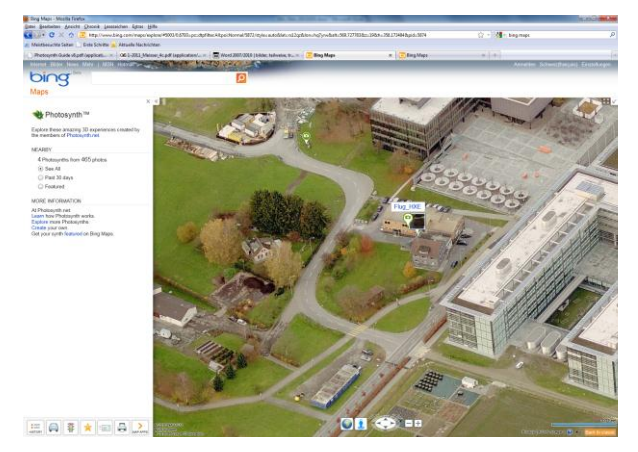


Abbildung 35: Kartenbasierte Websuche mit Bing/Maps und verlinkten, geogetaggten Photosynths

7.1.4 Erhaltene Daten

Online sind Photosynths in 4 Modi zu betrachten, als 2D-Bildübersicht, als Draufsicht auf die Punktwolke mit Überblendung der Kameraaufnahmepositionen und Blickwinkel, als 3D-Bildsammlung und als 3D-Punktwolke. Eine Prozentangabe, der sogenannte Synthyfaktor, gibt Auskunft darüber, wie viele der hochgeladenen Bilder zusammengesetzt werden konnten. Für die Weitervearbeitung der Daten mit Photosynth Toolkit ist ein Synthyfaktor von 100 % wichtig. Sollte dieser nicht erreicht sein, muss ein neues Photosynth erstellt werden, bei dem die nicht der gemeinsamen Szene zugeordneten Bilder nicht mit hochgeladen werden. Eine Löschung von Bildern und anschliessende Neuberechnung in einem bereits erstellten Photosynth ist nämlich nicht durchführbar.

[9] www.bing.com/maps, Stand: 27.01.2011

Eine Online-Navigation durch die gewonnene Punktwolke ist eingeschränkt ausführbar. Besser ist die Möglichkeit die Punktwolke inklusive der Kamerapositionen mit dem Programm SynthExport[10] im PLY-Format herunterzuladen. Die PLY-Datei kann anschliessend im Freeware-Programm MeshLab[11], einem 3D-CAD-Programm geöffnet werden. Die Raumwirkung kann durch die Vermaschung der Punktwolke verstärkt werden. Abbildung 36 zeigt die von Photosynth erstellte Punktwolke des HXE-Gebäudes von Nord-West mitsamt den in gelb dargestellten Kamerapositionen. Grundlage sind 264 Einzelbilder, die aus einer Videobefliegung des Gebäudes extrahiert wurden. Die aus den Kamerapositionen ersichtliche Flugbahn stellt den gelungenen Versuch Fassaden- und Nadiraufnahmen über eine Zwischenbahn mit Schrägaufnahmen zu verbinden, dar. In Abbildung 37 ist die vermaschte Photosynth-Punktwolke des Datensatzes HXE_MPA_Matlab zu sehen. Im Vergleich zum linken Bild liefert sie durch die geschlossenen Oberflächen einen besseren räumlichen Eindruck. Das in der ursprünglichen Punktwolke vorhandene Rauschen konnte bei der Vermaschung geglättet werden.

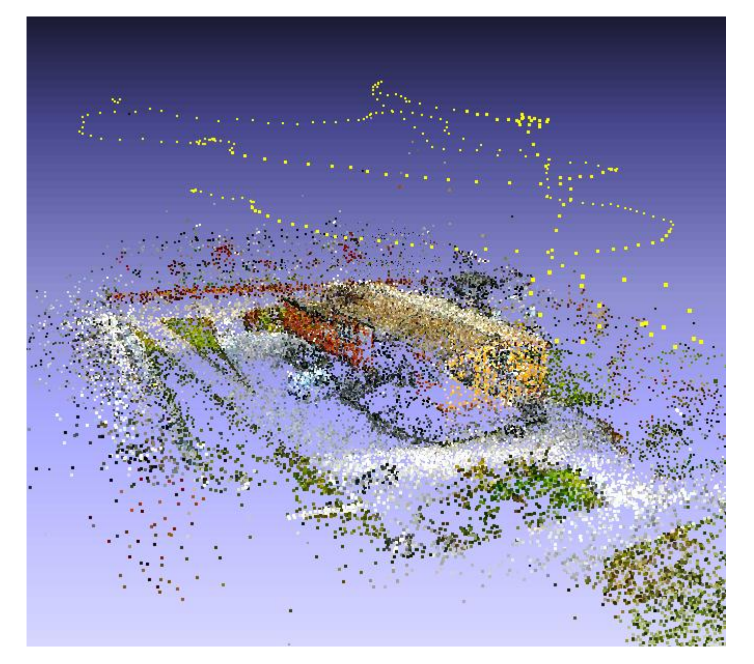


Abbildung 36: Punktwolke des HXE-Gebäudes aus Photosynth, erstellt aus Videobefliegung, in gelb die Kameraaufnahmepositionen



Abbildung 37: vermaschte Punktwolke aus Photosynth Datensatz: HXE_MPA_Matlab

Für die Weiterverarbeitung mit Photosynth Toolkit sind nur die Kamerapositionen entscheidend, sowie die im Zuge der Bündelblockausgleichung berechneten Kameraparameter für die Berücksichtigung der Verzeichnungen.

7.2 Photosynth Toolkit

Die Möglichkeit die rekonstruierten Kamerapositionen eines Photosynths zu erhalten, hat Henri Astre, einen CV-Interessierten, dazu veranlasst, das Programm Photosynth Toolkit[12] zu programmieren. Es handelt sich hierbei um ein Freewareprogramm, dass aufbauend auf den bekannten Kamerapositionen und frei zur Verfügung stehender Programmcodes der

[10] Download: http://synthexport.codeplex.com/releases/45675/download/122956, Stand: 25.01.2011
[11] Download: http://meshlab.sourceforge.net, Stand: 25.01.2011
[12] Download: http://www.visual-experiments.com, Stand: 25.01.2011

Bildverarbeitung, wie SIFT und PMVS, eine dichte 3D-Punktwolke der photographisch festgehaltenen Objekte erstellt.

7.2.1 Dense-Matching mit Photosynth Toolkit

Photosynth Toolkit ist ein Programmpaket, das in mehreren Schritten von den Ausgangsdaten aus Photosynth zu einer dichten 3D-Punktwolke führt. Die Grafik der Abbildung 38 stellt den übergeordneten Ablauf dar. Die Komponenten von Photosynth Toolkit sind grün umrahmt. Der letzte Schritt der Vermaschung mittels Poisson Surface Reconstruction wird bei mir nicht vom Programm ausgeführt, kann aber in MeshLab erfolgen. Die Systemvoraussetzungen sind bei Verwendung von Windows eine 64-bit-Version und wie bei allen bildverarbeitenden Prozessen ausreichend Prozessorleistung und Arbeitsspeicher. Die Installation der einzelnen Komponenten erfolgt beim von mir verwendeten Toolkit4 einwandfrei.

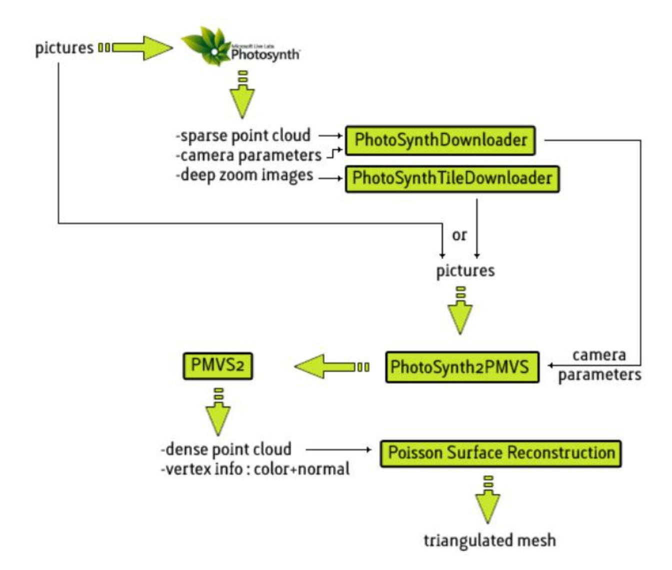


Abbildung 38: Ablauf zur Erstellung einer dichten Punktwolke mit Photosynth Toolkit (Astre, 2010)

7.2.2 Ausgangsdaten

Die Ausgangsdaten für Photosynth Toolkit werden zum einen vom Programm selbst zum gewünschten Photosynth heruntergeladen, zusätzlich müssen nur die Originalbilder, aus der das Photosynth erstellt wurde, vorhanden sein. Fehlen die Originalbilder, so soll es zukünftig auch möglich sein, diese von Photosynth herunterzuladen. Momentan ist es jedoch nur möglich, beim Fehlen der Originalbilder, die Vorschaubilder (thumbnails) von der Photosynthseite herunterzuladen und zu verwenden. Für einen ersten schnellen Ablauf der Prozessierung stellt die Verwendung der Minibilder immer eine gute Alternative dar. Bei Verwendung der im Videomodus erstellten Einzelbilder ist die Auflösung der Vorschaubilder mit 512 x 384 Pixeln nur unwesentlich kleiner als die 640 x 480 Pixel grossen Videobilder. Wichtig ist, dass die Bilder in Photosynth vollständig zu einer Szene zusammengesetzt werden konnten, ihr Synthyfaktor also 100 % ist.

7.2.3 Ablauf

In Schritt 1, *Download Synth*, fordert Photosynth Toolkit die Eingabe der URL des zu bearbeitenden Photosynths. Hierauf werden die in Photosynth ermittelten Kameradaten und die dort erstellte Featurepunktwolke, einmal mit und einmal ohne die Kamerapositionen, in den Ordner *bin* gespeichert. Werden auch die Voransichtsbilder vom Nutzer gewünscht, so werden diese in den

thumbs-Ordner heruntergeladen. Anschliessend ist der vom Programm geforderte 2. Schritt, *Put pictures in distort folder*, zu erledigen. Hierfür ist der erstellte *distort*-Ordner mit den Voransichtsbildern oder den Originalbildern zu versehen. „Distort“ steht in diesem Fall als Synonym für Distortion, was Verzeichnung bedeutet. Es soll Aussagen, das die hier befindlichen Bilder eigentlich noch nicht verzeichnungskorrigiert sind. Eine Verzeichnungskorrektur erfolgt vom Programm erst im 3. Schritt, *Prepare for PMVS2*. Hier werden die Originalbilder aufgrund der in Photosynth berechneten Kameraparameter verzeichnungskorrigiert und in den Ordner *visualize* abgespeichert. Für das Dense-Matching werden die Bilder aus dem *visualize*-Ordner verwendet. Des weiteren werden in Schritt 3 alle Einstellungen getätigt, die die Ausgestaltung der Punktwolke durch PMVS und somit die Dauer der Prozessierung bedingen. In Tabelle 3 wird eine kurze Zusammenstellung der einzelnen PMVS-Parameter gegeben wie sie in der Dokumentation von PMVS beschrieben sind (Furukawa, PMVS-Documentation, 2010).

Level (Bildpyramidenstufe) Default: 1, Einstellbar: 0 bis X	Entsprechend einer Bildpyramide wird das Originalbild (Level 0) oder ein um den Wert 2^{Level^2} kleineres Bild, was die Pixelanzahl betrifft, verwendet. Bei hochaufgelösten Bildern kann es bei Level 0 zu einem Überlaufen des Speichers kommen, deshalb wird für diese Bilder Level 1 als Minimum empfohlen. Die kleinen Videobilder konnte mit Level 0 ohne Probleme prozessiert werden
Csize (Cellsize/Zellengrösse/Abtastrate) Default: 2, Einstellbar: 0 bis X	Legt die Dichte der Rekonstruktion fest. PMVS versucht im durch die Cellsize vorgegebenen Raster einen Punkt zu rekonstruieren. Für dichtestes Matching sollte Cellsize 1 gewählt werden. Je grösser die Cellsize, desto schneller die Prozessierung
threshold (Rekonstruktionsgenauigkeit) Default: 0.7, Einstellbar: -1 bis 1	Eine Patch-Rekonstruktion wird akzeptiert, wenn ihre gemessene photometrische Konsistenz über dem Schwellenwert liegt, wobei -1 einer schlechten Konsistenz entspricht und 1 einer guten. Die photometrische Konsistenz wird über eine normalisierte Kreuzkorrelation gemessen.
wsize (Windowsize/Fenstergösse) Default: 7	Das Programm tastet wsize x wsize Pixelfarben von jedem Bild ab, um hieraus die Photokonsistenz in einer normalisierten Kreuzkorrelation zu berechnen bei einem Fester von 7 x 7 werden 49 Pixel in jedem Bild herangezogen. Je grösser der Wert ist, desto stabiler ist die Rekonstruktion, da weniger Fehlpatches vorhanden sind, wie auch grössere, texturarme Bereiche dichter rekonstruiert werden. Die Prozessierungszeit wird aber durch höhere Werte auch deutlich länger. max. Empfehlung: 10
minImageNum (min. Bildanzahl) Default: 3, Einstellbar: 2 bis X	Gibt an, in wie vielen Bildern ein 3D-Punkt zu sehen sein muss damit er rekonstruiert wird. In je mehr Bildern er enthalten sein muss, desto besser ist die Geometrie der Rekonstruktion. Bei schlechten Texturen sollte der Wert erhöht werden.
CPU (Anzahl verwendeter Kerne) Default: max. Anzahl Kerne	Die Software unterstützt multi-threading, d.h. mehrere Prozessoren können zur Berechnung verwendet werden. Je mehr Kerne verwendet werden, desto schneller ist die Berechnung. Jedoch besteht eine Gefahr des Überlaufen des Speichers.
useVisData (Sichtbarkeitsangaben) (Default -1) →optional	Sind die gegenseitigen Sichtbarkeiten innerhalb des Bildverbandes klar, so können diese verwendet werden, um das Matching dementsprechend zu begrenzen und damit zu beschleunigen. Häufig wird Software basierend auf dem Structure from Motion Ansatz für die Berechnung der Kamerapositionen verwendet. Diese besitzt meist die Sichtbarkeitsinformationen, die dann verwendet werden können.

Tabelle 3: einstellbare PMVS-Parameter und ihre Bedeutung

Abbildung 51 verdeutlicht die Auswirkungen unterschiedlich gewählter Parameter anhand einer Zusammenstellung des gleichen Projekts, prozessiert mit unterschiedlichen Parametern.

Bei der Wahl der Parameter ist immer die Rechenkapazität mit einzubeziehen, was bedeutet, dass der Wunsch nach einer möglichst dichten Punktwolke mitunter die Speicherleistung des Rechners übersteigt, bzw. die Prozessierungszeit ins Unendliche zu gehen scheint. Das zu wählende Level und die Cellsize sind die entscheidenden Faktoren für die Prozessierungszeit und die Punktdichte. Für alle Datensätze konnten mit den voreingestellten Default-Werten ansehnliche Punktwolken erstellt werden.

Liegen nur wenige hochaufgelöste Bilder vor, so kann das niedrigste Level 0 gewählt werden. Sind es hingegen mehr als 20 hochaufgelöste Bilder, so sollte zunächst min. Level 1 ausgewählt werden, um ein Ergebnis innert abwartbarer Frist zu erhalten. Für die Videobilder mit ihrer geringen Auflösung wurde das Dense-Matching auch mit 700 Bildern in Level 0 erfolgreich durchgeführt.

Sind die Einstellungen in Schritt 3 getätigt, kann die Prozessierung durch Ausführen der Batchdatei *launch-pmvs* gestartet werden. Das Programm verwendet für die Prozessierung die verzeichnungskorrigierten Bilder, die sich im Ordner *visualize* befinden. Es sucht zunächst in allen Bildern Featurepunkte. Anschliessend beginnt es die Featurepunkte unter den Bildern zu matchen. Der Aufwand steigt also exponentiell zur Anzahl der beteiligten Bilder, ihrer Grösse und der gewünschten Rekonstruktionsdichte. Wären Sichtbarkeitsangaben verfügbar, könnte das Matching auf sinnvolle Bildkombinationen begrenzt werden. In einer neueren Version von Photosynth Toolkit wird es möglich sein, Sichtbarkeitsangaben aus einer schnellen, wenig dichten Prozessierung in hohen Levels zu erhalten, um diese dann bei dichten Prozessierungen in tiefen Levels ressourcenschonend verwenden zu können.

Im Command-Fenster kann der aktuelle Programmablauf betrachtet werden. Es ist von Vorteil die Batchdatei aus dem Command-Fenster heraus zu starten, da im Falle eines Fehlers dieser im offenbleibenden Commandfenster protokolliert wird. Abbildung 39 zeigt das Commandfenster zu Beginn der Prozessierung. Oben sind die gewählten Parameter zu sehen, gefolgt von der Anzeige der eingelesenen Bilder. Jeder Stern steht für ein eingelesenes Bild. Die folgenden Textzeilen zeigen die beiden Methoden der Keypointgenerierung, Difference of Gaussian (DoG) und Harris Edge Detector (Harris), die auf jedes Bild angewendet werden, mit der Anzahl gefundener Keypoints.

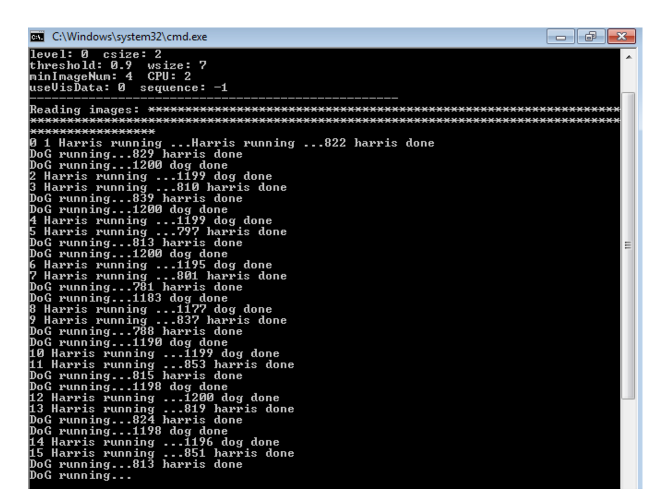


Abbildung 39: Keypointgenerierung mit Photosynth Toolkit, basierend auf DoG und Harris Edge Detector.

Nach erfolgreichem Durchlaufen der weiteren unter 5.2 beschriebenen PMVS Schritte: Matching, Expansion, Filtering wird das Command Fenster geschlossen und die Prozessierung ist beendet.

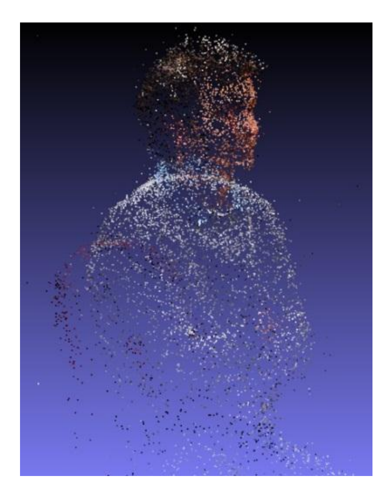
7.2.4 Ergebnisse von Photosynth Toolkit

Als Ergebnisse sind drei Dateien im vom Programm erstellten Ordner *models* zu finden. Diese beinhalten in unterschiedlichen Formaten die erstellten 3D-Punkte. Sowohl in der PLY-Datei, als auch in der Patch-Datei sind neben den Punktkoordinaten die Farbwerte und die Normalen der Punkte vorhanden. In der PSET-Datei fehlen die Farbwerte. Für die weitere Bearbeitung mit einem 3D-CAD-Programm, ist das PLY-File zu verwenden und kann beispielsweise in MeshLab eingelesen werden. Die Patch-Datei, enthält neben den Koordinaten, der Normalen und dem Farbwert eines Punktes, auch noch Angaben in welchen Bildern der Punkt enthalten ist. Diese Informationen könnten z.B. für eine eigenständige Rückprojektion zur Validierung und Verbesserung der Punktwolke verwendet werden. Auch die Sichtbarkeiten unter den Bildern können hieraus ausgewertet werden. Die unter 7.2.3 angedeuteten Verbesserungen aufgrund von Sichtbarkeitsangaben in einer neuen Toolkit Version werden aus der Patch-Datei erstellt werden.

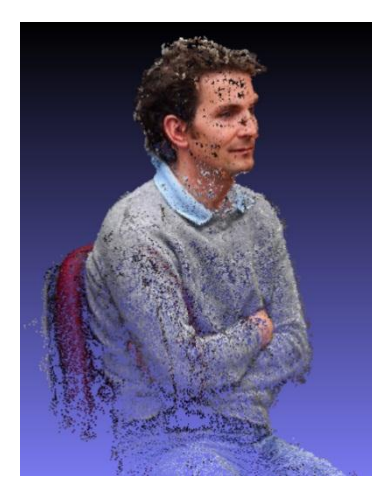
Beim Einlesen der original PLY-Datei ins das Programm Geomagic Studio 12 kann der Farbwert nicht gelesen werden. Wird die Originaldatei aber zunächst im Programm MeshLab geöffnet und erneut als PLY-Datei abgespeichert, so ist der PLY-File auch in Geomagic als eingefärbte 3D-Punktwolke zu betrachten. Folgende Darstellungen zeigen mittels Photosynth Toolkit erstellte 3D-Punktwolken unterschiedlichster Datensätze. Teilweise sind sie im Vergleich zu der original Photosynth Punktwolke oder einem Originalbild angeordnet, teilweise in weiterverarbeiteter Form, als vermaschte Punktwolke, dargestellt. Eine detaillierte Übersicht zu den dargestellten Datensätzen findet sich im Anhang.



Originalbildausschnitt



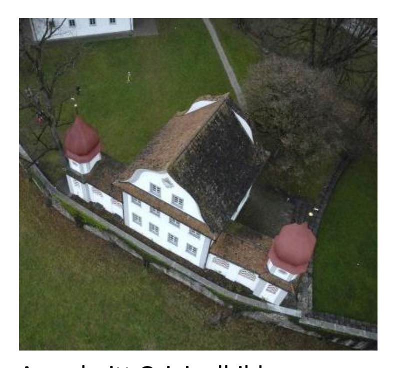
Punktwolke aus Photosynth



Punktwolke aus Photosynth Toolkit

Abbildung 40: Datensatz Christoph2 (Photosynth: Christoph2_0bis_155)

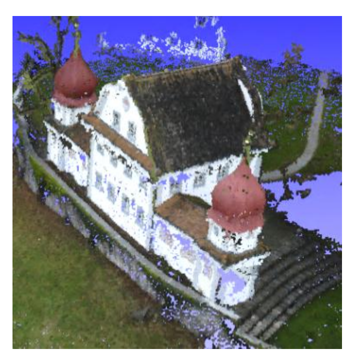
Abbildung 40 ist Teil einer Versuchsreihe, Personen aus Bildern zu rekonstruieren. Der Datensatz wurde im Videomodus erstellt, wobei die dargestellte Person in zwei konzentrischen Kreisen umrundet wurde. Der Originalbildauschnitt links, ist eine Aufnahme aus dem Kreis mit dem grösseren Abstand. Der zweite Kreis wurde so eng um die Person gelegt, dass von ihr nur noch Kopf und Schultern in den Bildern zu sehen waren. Die dadurch grössere Detaillierung im Schulter und Kopfbereich ist in der mittleren Darstellung, der Punktwolke aus Photosynth gut zu erkennen. Bei der rechts dargestellten, mittels Dense-Matching verdichteten Punktwolke aus Photosynth Toolkit kann der Dichteunterschied auch erahnt werden. Mängel, wie unter Kapitel 8.3 beschrieben, zeigen sich in Löchern in texturarmen Bereichen und falsch eingefärbten Punkten an den Aussenrändern der Person, die die Farbe des Hintergrundes besitzen. Möglichkeiten fehlerhaftes Dense-Matching mit dem Hintergrund zu vermeiden bestünde durch das Maskieren des Objekts.



Ausschnitt Originalbild



3D-Punktwolke nach 1. Prozessierung



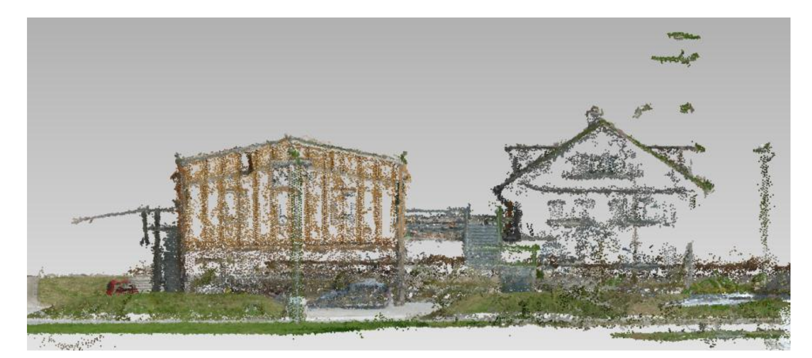
3D-Punktwolke nach 2-facher Verzeichnungskorrektur

Abbildung 41: Datensatz Landenberg (Photosynth: mitte Landenberg_alle_Heli_verwendet_ohne5Seitbilder, re. Landenberg_Sarnen_undistort)

In Abbildung 41 ist links ein Originalbildauschnitt eines hochaufgelösten Bildes zu sehen. Der prozessierte Datensatz besteht aus insgesamt 50 Schrägbildern und entstand im Rahmen der Bachelorarbeit von Hannes Püschel (Püschel, Sauerbier, & Eisenbeiss, 2008). Die Bilder wurden von einem UAV, von einer um das Gebäude herum geflogenen Kreisbahn aus, aufgenommen. Die grossen Löcher rechts vom Gebäude, im mittleren und rechten Bild die beide rekonstruierte Punktwolken zeigen, sind dort, wo im Originalbild ein Baum zu sehen ist. Feine Vegetation wird häufig schlecht in den Rekonstruktionen dargestellt, da sich bei Wind ihre Lage vom einen Bild zum Nächsten verändert. Ein weiterer Grund ist, dass ihre 3D-Struktur sehr kleinteilig ist, und sich selbst bei nur kleinen unterschieden im Blickwinkel durch Verdeckungen keine gemeinsamen Featurepunkte zum Matching finden lassen. Im Vergleich des Bildes in der Mitte zum Bild rechts fällt auf, das die Dächer der Türme im rechten Bild deutlich besser rekonstruiert wurden. Der Unterschied in den beiden Datensätzen liegt darin, dass im rechten Datensatz verzeichnungskorrigierte Bilder verwendet wurden. Hierfür wurde die Prozessierung mit Photosynth zwei Mal durchgeführt. Beim zweiten Mal wurden die von Photosynth Toolkit nach dem ersten Photosynth-Durchlauf erstellten, verzeichnungskorrigierten Bilder erneut in Photosynth eingeführt. Dieser nicht ganz ordentliche Schritt, war die einzige Möglichkeit, verbesserte Bilder einzuführen, da die Kamera der Befliegung nicht für eine Kalibrierung in Matlab (vgl. 4.4) zur einheitlichen Verzeichnungskorrektur verfügbar war. Die Verbesserungen in der Rekonstruktionsdichte zeigen aber, dass die gewählte Vorgehensweise zum Erhalt schönerer Visualisierungen von fremden Datensätzen geeignet ist.



Draufsicht



orthogonale Seitenansicht

Abbildung 42: Datensatz HXE_MPA_Matlab (Photosynth: HXE_MPA_Matlab)

Die beiden Bilder in Abbildung 42 stellen die mit Photosynth Toolkit verdichtete Rekonstruktion des HXE-Gebäudes der ETH dar. Grundlage bilden insgesamt 49 hochaufgelöste Bilder die im Rahmen der Masterprojektarbeit des Autors entstanden (Ober, 2010). Das ganze Gebiet wird in 32 Nadirbildern abgedeckt, die beiden Gebäude sind in 17 Fassadenschrägaufnahmen zusätzlich erfasst. Die Bilder

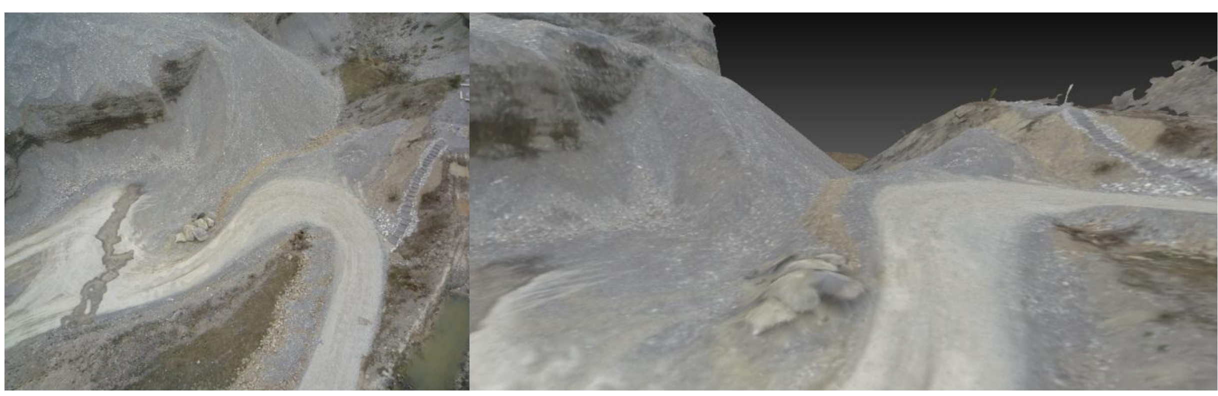
wurden vor ihrer Prozessierung mit der Photosynth-Toolkit-Variante mit Matlab verzeichnungskorrigiert. Die Anzahl rekonstruierter Punkte ist hierdurch verglichen mit der Prozessierung unkorrigierter Bilder um 25 % höher und liegt bei über 2 Mio. Punkten. Fehlerhafte Punkte in texturarmen Bereichen oder bei repetitiven Mustern, wie beim verzeichnungsbehafteten Datensatz in Abbildung 60 zu sehen, sind kaum mehr vorhanden. Die grünen Linien im rechten Bild der Abbildung 42, rechts oben über dem rechten Gebäude sind allerdings falsch eingefärbte Punkte der auf dem Dach montierten Antennenanlage. Diese kann ihre Position während der Aufnahmen aufgrund von Wind leicht verändert haben, was zu Fehlern in der Rekonstruktion führen kann.



Ausschnitt Originalbild rekonstruierte 3D-Punktwolke vermaschtes 3D-Modell

Abbildung 43:Datensatz Duebendorf, (Photosynth: Duebendorf_58_91_Matlab)

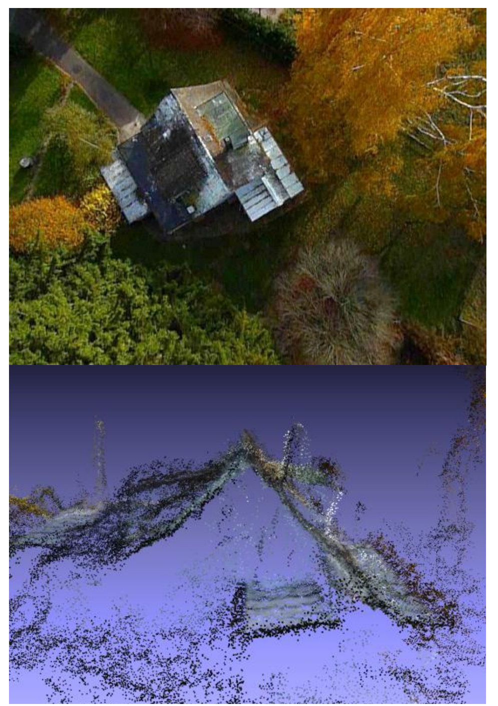
Die drei Darstellungen der Abbildung 43 sind aus einer Nadirbefliegung des Flughafens Dübendorf entstanden. In den Originalbildern des Datensatzes, wie links zu sehen, sind Höhen nicht herauszulesen. In der 3D-Rekonstruktion können diese koordinatenmässig erfasst werden, bzw. bei geeigneter Perspektivenwahl auch in Bildern dargestellt werden. Im rechten Bild ist beispielweise an den orangefarbenen Bögen, einem Spielgerät an dem eine Schaukel aufgehängt ist, zu erkennen, dass die Punktwolke volle 3D-Funktionalität besitzt. Auch unter den Bögen ist der Boden durchlaufend dargestellt. Dies ist ein riesiger Vorteil gegenüber texturierten Oberflächenmodellen, die meist nur 2.5-D darstellen können, also nur einen Höhenwert pro Lagekoordinatenpaar abbilden. Das mittlere Bild zeigt im Vergleich zum Originalbildauschnitt die hohe Detaillierung der mittels PMVS dichtgematchten Punktwolke. Löcher, die in der Punktwolke noch vorhanden sind, können durch Vermaschung, wie im rechten Bild passiert, gestopft werden und so zu einheitlichen Oberflächen führen. Dass im vermaschten Modell noch Löcher vorhanden sind und manche Vermaschungen, z.B. entlang des Zauns, der mittig in allen Bildern auszumachen ist, nicht gut ausgeführt sind, liegt an der fehlenden manuellen Bearbeitung des Modells.



Ausschnitt Originalbild vermaschtes 3D-Modell

Abbildung 44: Datensatz Kiesgrube Sommer (Photosynth: Kiesgrube_Sommer_00_90_kleinjpg)

Die beiden Bilder der Abbildung 44 zeigen eine Kiesgrube. Links ist ein Originalbild des Datensatzes zu sehen, der 91 hochaufgelöste Nadir- und Schrägaufnahmen der Grube enthält. Aufgrund der guten Textur, die in den Bildern vorhanden ist, konnte eine mit nur wenigen Löchern versehene Rekonstruktion erstellt werden. Das vermaschte Modell hat deswegen auch einen hohen Detaillierungsgrad in der Textur. Die auf das vermaschte Modell aufgetragene Textur ist nicht etwa aus den Bildern auftexturiert, sondern aus den Farbwerten der rekonstruierten Punkte übertragen.



oben: Originalbild aus Videobefliegung
unten: Detail in Punktwolke



Punktwolke aus Videobefliegung; Kamerapositionen: gelb

Abbildung 45: Datensatz HXD-Gebäude, aus Videobefliegung (Photosynth: Architekten_Haeuschen_444_544)

Die im Videomodus durchgeführte Befliegung des HXD-Gebäudes hat zu den in Abbildung 45 dargestellten Bildern geführt. Links oben ist ein aus dem Video extrahiertes Einzelbild zu sehen. Man erkennt, dass das Gebäude eine gute Textur bietet, da es vom Architekturlehrstuhl als Kunstobjekt verwendet wird, was zur uneinheitlichen Farbgebung geführt hat. Die herbstliche Färbung der Blätter ist auch geeignet um nicht nur schöne, sondern auch in der Vegetation dichte Rekonstruktionen zu ermöglichen. Dass die Vegetation in der Rekonstruktion so gut dargestellt ist, liegt allerdings nicht nur an der Farbenvielfalt, sondern auch an der Videobefliegung. Die extrahierten Einzelbilder zeigen kurze Abstände zwischen ihren Aufnahmepositionen, die als gelbe Punkte im rechten Bild der Punktwolke dargestellt sind. Da es bei der Befliegung zusätzlich windstill war, können Featurepunkte auch in den kleinstrukturierten Baumbereichen in nah beieinanderliegenden Bildern gematcht werden. Anhand des links unten dargestellten Details, welches das Dach des Gebäudes von der Seite zeigt, sind aber auch Fehler, die durch die kurzen Basislängen entstehen können, zu sehen. In den Dachflächen ist ein grosses Rauschen der Punkte in der Höhenkomponente vorhanden, was auf die schlechten Schnittgeometrien als Folge der kurzen Basen zurückzuführen sein könnte.

8 Modellierung und Analyse

Die Modellierung erfolgt mit dem Freeware-Programm MeshLab und dem proprietären Programm Geomagic Studio 12. Die aus Photosynth Toolkit erstellten PLY-Files werden in MeshLab eingelesen und dort betrachtet, bzw. da Geomagic die original Toolkit-PLY-Dateien nicht farblich darstellt, in MeshLab abgespeichert und in Geomagic bearbeitet und analysiert.

8.1 MeshLab

MeshLab ist ein frei erhältliches 3D-Triangulations-Programm, das seit 2005 als Open-Source-System entwickelt wird. Es ist für die Prozessierung von grossen 3D-Punktwolken gedacht, wie sie beim 3D-Scanning entstehen. Eine grosse Anzahl von Tools ermöglicht das Editieren, Bereinigen, Analysieren, Vermaschen und Konvertieren der Punkte und Dreiecke. Die automatischen Bereinigungsfilter bieten das Entfernen von doppelten, unreferrenzierten Knoten und nicht mannigfaltigen Kanten und Dreiecken an. Vermaschungstools ermöglichen qualitativ hochstehende Vereinfachungen, basierend auf Quadratsummenfehlerberechnungen. Zwei Algorithmen zur Vermaschung der Punktwolken sind enthalten. Einer basiert auf der Ball-Pivot-Technik, der andere auf dem Poisson-Surface-Ansatz. Weitere Möglichkeiten sind die Registrierung verschiedener Punktwolken nach dem ICP (Iterative Closest Point) Algorithmus und die Anwendung diverser Filterverfahren zur Rauschreduktion. MeshLab läuft auf allen gängigen Betriebssystemen und unterstützt die Formate: PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, VRML 2.0, U3D, X3D und COLLADA. Es wird in vielen Gebieten der Forschung und Wissenschaft angewendet, wie z.B. im Bereich des Denkmalschutzes und der Archäologie. (MeshLab)

Bei der Betrachtung und Bearbeitung der aus Photosynth-Toolkit gewonnenen 3D-Punktwolken geht es vor allem darum zu sehen, wie die Qualität der Punktwolke ist. Hierbei ist zu achten auf ein: vorhandenes Rauschen, die Geometrie der Objekte und die Verteilung der Punkte. Es soll aber auch versucht werden, aus den gewonnenen Daten vorführbare Modelle zu generieren, bzw. den Nutzen und die Güte dieser zu beurteilen. Für die Erstellung von Modellen sind geschlossene, texturierte Oberflächen erstrebenswert, da hierdurch die reale Szene am vielfältigsten wiedergegeben werden kann. Die Punktwolken können durch Triangulation, basierend auf unterschiedlichen Methoden, vermascht werden, um Oberflächen zu erhalten.

8.2 Vermaschungsalgorithmen

Die beiden eingesetzten Arten von Vermaschungsalgorithmen sind die Poisson Surface Reconstruction (PSR) und der Ball-Pivot-Algorithmus (PBA). PSR betrachtet die Oberflächenrekonstruktion als Randwertproblem, dessen Lösung eine bestmögliche Oberfläche bringt. BPA versucht mittels eines virtuellen Balls, der über die Punktwolke rollt, Oberflächen zu generieren. Folgende rudimentäre Erklärungen zu den beiden Algorithmen sind den jeweiligen Publikationen der Entwickler entnommen. Detaillierte Informationen können den angegebenen Quellen entnommen werden.

8.2.1 Poisson Surface Reconstruction (PSR)

Der Algorithmus der Poisson Surface Reconstruction sieht die Vermaschung von orientierten Punkten als ein räumliches Randwertproblem an.

Der Grundgedanke ist, dass es eine Beziehung zwischen den Punktnormalen und den Flächen, denen die Punkte entstammen, gibt. Den Kern bildet eine 3D-Indikator-Funktion χ, die definiert ist als 1 für Positionen innerhalb des Modells und als 0 für Positionen ausserhalb des Modells. Über die Gradienten der Funktion, die an der Modelloberfläche den Punktnormalen gleichen, wird eine Verbindung zwischen der Funktion, die das Modell beschreibt und den Punkten, die die Realität darstellen, geknüpft. Die Lösung reduziert sich somit darauf, die Funktion χ zu finden, deren Divergenz des Gradientenfeldes ($\Delta\chi$) bestmöglich die Divergenz des Vektorfeldes der Punktnormalen ($\nabla \cdot \vec{V}$) approximiert. In einer Formel ausgedrückt lautet dies, wie folgt:

$$\Delta\chi \equiv \nabla \cdot \nabla_{\chi} = \nabla \cdot \vec{V}$$

In Abbildung 46 ist eine auf 2D reduzierte Illustration der Poisson Surface Reconstruction zu sehen. Sie verdeutlicht den Zusammenhang von Indikatorfunktion χ_M und dessen Gradienten $\nabla\chi_M$ zum Vektorfeld der Punktnormalen $\vec{V}$ und der Modelloberfläche ∂M.

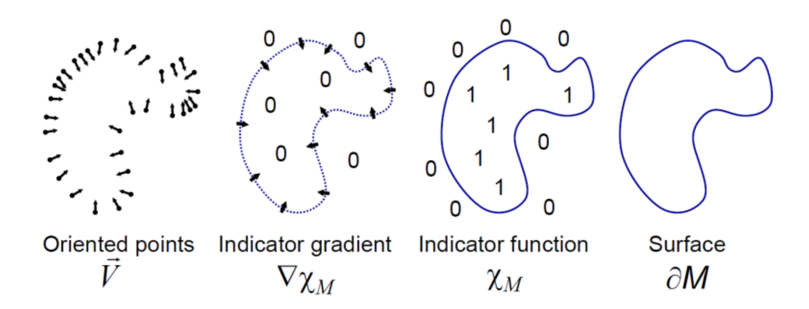
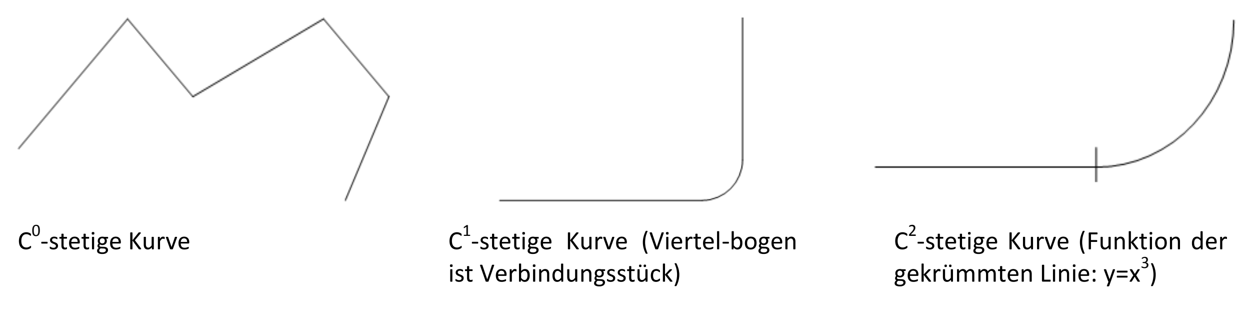


Abbildung 46: Poisson Surface Reconstruction vereinfacht dargestellt in 2D (Kazhdan, Bolitho, & Hoppe, 2006)

Der Poisson Ansatz berücksichtigt alle Oberflächenpunkte auf einmal, ohne räumliche Unterteilung, und ist deshalb sehr nachgiebig gegenüber Rauschen. Die Möglichkeit des Poisson Ansatzes, auf einer Hierachie von lokalen Basisfunktionen aufzubauen, ermöglicht die Komplexität auf ein beschränktes, lineares System zu reduzieren. PSR ist ein sich räumlich anpassender Algorithmus, der in mehreren Detailierungsstufen gewählt werden kann (Kazhdan, Bolitho, & Hoppe, 2006). Die Dauer für die Prozessierung richtet sich nach der Grösse und dem Detailierungsgrad der Punktwolke und der zu erstellenden Rekonstruktion. Der Algorithmus benötigt zwingend Punkte die eine Normale besitzen, also orientiert sind. Dies ist bei den Ausgabedaten der meisten Scanner, wie auch von bei Photosynth Toolkit und Bundler gegeben.



C^0-stetige Kurve

C^1-stetige Kurve (Viertel-bogen ist Verbindungsstück)

C^2-stetige Kurve (Funktion der gekrümmten Linie: $y=x^3$)

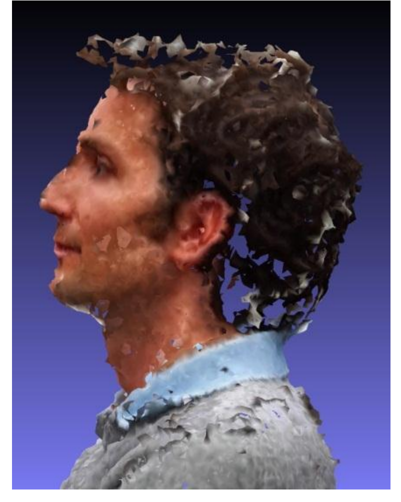
Abbildung 47: C0-, C1-, C2-Krümmungen von Oberflächen, vereinfacht in 2D dargestellt

Vermaschungen mit PSR können nur Oberflächen richtig nachbilden, die C1 oder C2 gekrümmt sind. Bei Oberflächen mit Kanten, was eine C0-Krümmung bedeutet, ist die Nachbildung falsch. Abbildung 47 zeigt vereinfacht drei Oberflächen, als Schnitt im zweidimensionalen Raum, die sich in ihrer Krümmung unterscheiden.

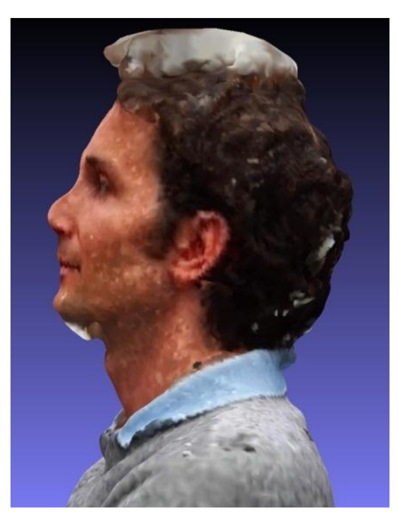
In Abbildung 48 wird ein visueller Vergleich mit dem BPA und einem Originalbild ermöglicht. Im rechten Bild ist zu sehen, dass durch PSR Oberflächen entstehen, die von ihrer Krümmung her stetig sind und keine Löcher aufweisen. Das in der ursprünglichen Wolke vorhandene Rauschen, das in Abbildung 40 zu sehen ist, beeinträchtigt die PSR nicht sichtbar. Zu erkennen ist aber die glättende Wirkung von PSR, die zur Verminderung der Detailierung führt. Die dargestellte PSR-Vermaschung wurde nur mit einer Detaillierungsstufe, oft als Octree Depth bezeichnet, von 9 erstellt, obwohl theoretisch die Wahl bis Stufe 11 möglich ist. Hier könnten dann auch kleinteiligere Oberflächenveränderungen berücksichtigt werden, indem Polynome höheren Grades zur Oberflächenrekonstruktion verwendet werden. Bei der mit MeshLab durchgeführten PSR-Vermaschung konnten jedoch keine Vermaschungen über Stufe 9 durchgeführt werden. Ab Stufe 9 war kein Ende der Prozessierung innert abwartbarer Zeit zu erreichen. Der weisse Bereich auf dem Kopf, ist zum einen farblich Fehlmatches bei der Punkterstellung zuzuordnen, die Form allerdings ist wegen der nicht ausreichend hohen Detaillierungsstufe vereinfacht dargestellt. Bei höherer Detailierungsstufe sollte sich die Form, derjenigen in im linken Originalbild angleichen.



Originalbild



Modell aus BPA-Vermaschung



Modell aus PSR-Vermaschung

Abbildung 48: Vergleich von BPA (li.) und PSR (re) an Datensatz Christoph2 (Photosynth: Christoph2_0bis_155)

8.2.2 Ball Pivot Algorithmus (BPA)

Der Ball Pivot Algorithmus berechnet eine Dreiecksvermaschung durch Interpolation einer gegebenen Punktwolke mittels eines virtuellen Balls. Typischerweise sind die orientierten Punkte Teil einer Oberfläche, die z.B. von einem Scanner erfasst wurde. Das Prinzip des BPA ist sehr einfach. Drei Punkte bilden ein Dreieck wenn der Ball mit der vom Anwender vorgegebenen Grösse sie berührt ohne einen weiteren Punkt zu berühren. Von einem Ausgangsdreieck startend rollt der Ball solange bis er keine unberührten Punkte mehr findet. Anschliessend startet er erneut, bei einem Ausgangsdreieck, geformt von drei bisher unberührten Punkten. Der Prozess wird solange durchgeführt, bis alle Punkte berücksichtigt wurden. In Abbildung 49 ist der zu Grunde liegende Ablauf der Einfachheit halber in 2D dargestellt. In blau ist der Ball, in schwarz sind die Oberflächenpunkte und die echte Oberfläche, und in rot die mittels Vermaschung rekonstruierte

Oberfläche dargestellt. Haben die Oberflächenpunkte eine regelmässige Verteilung und besitzt die Oberfläche gleichmässige Form, so ist die Rekonstruktion wie in Detail (a) zu sehen nah am Original. Sind die diskreten Punkte ungleichmässige verteilt, so können, wie in Detail (b) ersichtlich, Löcher entstehen, wenn der Punktabstand zu gross gegenüber dem Balldurchmesser ist. Detail (c) zeigt, dass andererseits Oberflächendetails verloren gehen, wenn die Krümmung der Oberfläche grösser ist als der reziproke Kugelradius.

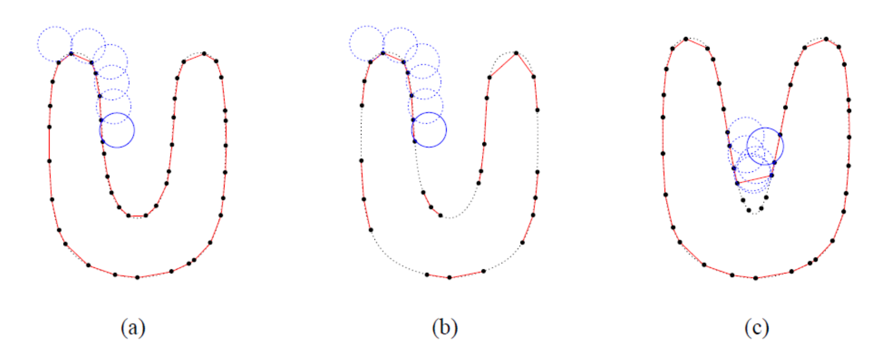


Abbildung 49: Der Ball Pivot Algorithmus in 2D. (Bernardini, Mittleman, Rushmeier, Silva, & Taubin, 1999)

Der BPA erzielt gute Ergebnisse bei einer relativ gleichmässigen Dichte der Punktwolken. Der Algorithmus lässt nur die Einstellung eines festen Radius zu. Er kann aber iterativ verändert werden, von kleinen Radien für dichte, detailreiche Regionen zu grösseren Radien für spärlicher dargestellte, ebene Bereiche. Um in dichten Bereichen nicht zu viele kleine Dreiecke zu erstellen, kann eine Clustering-Distanz angegeben werden. In der Folge werden keine Punkte berücksichtigt, die innerhalb dieser bestimmten Distanz um einen Punkt, z.B. 20 % des Ballradius, liegen. Um bei einem Rauschen in den Punkten trotzdem eine glatte Oberfläche zu erhalten, sind Filter eingebaut. Einer vergleicht zum Beispiel die Punktnormalen der möglichen drei Eckpunkte mit der Normale der sie verbindenden Fläche. Ist der Unterschied gegenüber der Vorgabe zu gross, wird die Fläche nicht gebildet. Ein anderer Filter überprüft den Winkel zwischen zwei benachbarten Dreiecken. Übersteigt dieser die Vorgabe von z.B. 90 Grad, so wird das neue Dreieck nicht vom der bestehenden Oberfläche aus gebildet. (Bernardini, Mittleman, Rushmeier, Silva, & Taubin, 1999)

Im mittleren Bild der Abbildung 48 ist ein Modell basierend auf einer BPA-Vermaschung dargestellt. Das in der ursprünglichen Punktwolke enthaltene Rauschen führt zur Bildung einer ungleichmässigen, schroffen Oberfläche, bestehend aus Dreiecken. Diese Dreiecke bilden keine zusammenhängende Form, sondern weisen Löcher auf. Die Löcher finden sich in Bereichen wo grosse Unterschiede in den Normalen der Punkte vorhanden sind, z.B. im kleinteilig strukturierten Haarbereich. Kanten bzw. Wechsel in der Oberflächenneigung können durch BPA gut nachgebildet werden.

8.3 Analyse der Modelle

Bei der Betrachtung der dichtgematchten Punktwolken und vermaschten Modelle können Fehler und Schwächen einfach erkannt werden, wie teilweise schon bei der Darstellung der Photosynth Toolkit Ergebnisse in Abschnitt 7.2.4 aufgezeigt. Zu berücksichtigen ist bei der Analyse immer das eingeführte Bildmaterial. In erster Linie ist hierbei immer die Textur die in den Bildern, bzw. auf den Objekten vorhanden ist, entscheidend. Des Weiteren sind die Aufnahmekonfiguration der Bilder in die Bewertung der Analysen mit einzubeziehen, bzw. aus den Analysen Rückschlüsse auf bessere Vorgehensweisen bei der Bildaufnahme zu ziehen. Auch die Eigenheiten der Kamera, wie die

beschränkte Auflösung im Videomodus oder Verzeichnungen, sind bei der Analyse zu berücksichtigen. Eventuelle Verbesserungen auf Grund von anderen Kameras oder einer aufwändigeren Vorverarbeitung der Bilder können so in Betracht gezogen werden. Die Parameter bei der Prozessierung des Dense-Matching sind vor allem für die Dichte der Punktwolke und das darin enthaltene Rauschen ausschlaggebend. Die Geometrie der Kamerapositionen, mit eventuellen Lagefehlern und die Kameraparameter, beide berechnet aus der Bündelblockausgleichung in Photosynth bzw. Bundler, haben aber grundlegende Auswirkung auf das Dense-Matching in PMVS.

8.3.1 Rauschen

Je nach Einstellung der Zuverlässigkeit des Dense-Matching ist das Rauschen in der 3D-Punktwolke grösser oder kleiner. Es unterscheidet sich aber innerhalb des Modells vor allem aufgrund der Textur, die vorhanden ist. In homogenen Bereichen ist es immer grösser als in texturreichen Zonen. Ein zu grosser Kontrast, scheint allerdings einen negativen Einfluss auf die relative Punktlage zu haben. So ist an Schattenkanten oder an schwarz-weissen Targets die Höhenlage der dargestellten Punkte stark variierend. Bei den Targets könnte die Ursache in der Überstrahlung des weissen Innenbereichs über die schwarze Aussenfläche liegen. Folge hiervon ist, dass die Kreise in unterschiedlichen Bildern nicht nur wegen der Perspektive unterschiedlich aussehen, sondern dies verstärkt wird, durch Überstrahlung. Das Dense-Matching würde somit Pixel bildübergreifend verbinden, die nicht identische Bereiche zeigen, bzw. an Positionen liegen, die nicht der Wirklichkeit entsprechen. Dieser Positionsfehler im Bild würde, wenn man an einen Vorwärtsschnitt denkt, einen Höhen- und Lagefehler im Modellraum erklären. Weitere fehlerhafte Pixel lassen sich an Kanten von Objekten hin zum offenen Raum ausmachen. Sie treten oft in der Form eines Schweifes auf. Mittels der einstellbaren Parameter von PMVS lassen sich unterschiedliche Punktwolken erstellen. Die Abbildung 50 zeigt die Originalbilder des Physik-Datensatzes, während Abbildung 51 Ansichten der prozessierten Datensätze beinhaltet. Die Prozessierungen wurden mit unterschiedlichen Parametern der Zuverlässigkeit der Punkte (threshold) bzw. unterschiedlicher Einstellungen zur Rekonstruktionsdichte (cellsize) und Fenstergrösse der Kreuzkorrelation (windowsize) durchgeführt (Parameterdetails, siehe Tabelle 3).












Abbildung 50: Alle 7 Bilder des Physik-Datensatzes (Photosynth: Physik)

In Reihe 1-3 wird die Punktwolke aus unterschiedlichen Positionen betrachtet. In der ersten Reihe ist eine Übersicht von vorne, in der zweiten Reihe ist eine Ansicht von oben, ohne die ausgeblendeten Bodenpunkte und in der dritten Reihe ist die Punktwolke von rechts zu sehen. Die Parameter der spaltenweise unterteilten Prozessierungen finden sich in den Reihen vier bis acht. Es ist deutlich in den Drauf- und Seitenansichten zu erkennen, dass das Rauschen mit Erhöhung der Zuverlässigkeit abnimmt. Gleichzeitig sinkt aber auch die Anzahl rekonstruierter Punkte.

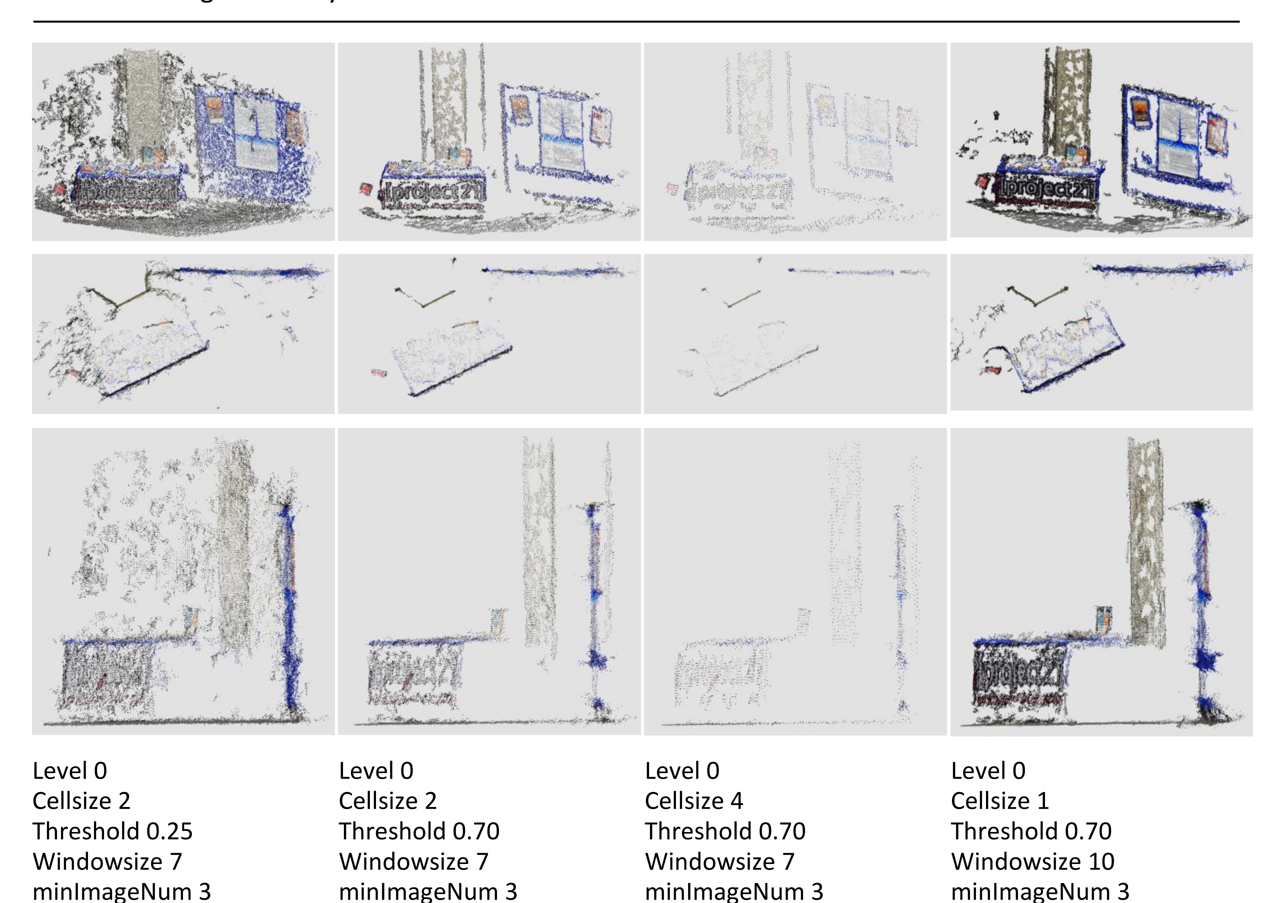


Abbildung 51: Datensatz Physik, prozessiert mit unterschiedlichen Parametereinstellungen (Photosynth: Physik)

8.3.2 Textur

In texturarmen Bereichen der Bilder werden kaum Featurepunkte generiert, wie aus den Erläuterungen zu SIFT in Kapitel 5.1 nicht anders zu erwarten. Somit können ausgehend von den Featurepunkten als Keimzelle des Dense-Matching auch keine guten Patches gebildet werden. Nur bei einer niedrig gesetzten Schwelle für die photometrische Konsistenz, werden in texturarmen Bereichen Patches gebildet. Diese besitzen aber ein hohes Rauschen und fallen deshalb bei einem höher gewählten threshold-Wert weg. Bei optischem Vergleich der Spalte 1 zur Spalte 2 in Abbildung 51, kann dies belegt werden. Der bei Spalte 2 höhere threshold-Wert führt zu einer weniger dichten, dafür rauschärmere Punktewolke, gerade in den texturarmen Bereichen der blauen Leinwand. Mit Erhöhung der Windowsize können beim Vergleich von Spalte 2 und Spalte 4 mehr Punkte an den Grenzen zu Bereichen mit einheitlichen Texturen erstellt werden. Wird hingegen die Cellsize erhöht, ist wie zu erwarten die Dichte der rekonstruierten Punkte geringer. Dies kann gut im Vergleich der Spalten 2 und 3 gesehen werden.

8.3.3 Geometrie

In den dargestellten Punktwolken aus Abbildung 51 fällt auf, dass die Geometrie der Objekte, die im Zentrum der Bilder vertreten sind, besser ist als die Geometrie, der in den Aussenbereichen der Bilder abgelichteten Objekte. Gut zu sehen ist dies bei den Punkten der Leinwand. Hier verstärkt sich in der Ansicht von oben die Punktwolke der eigentlich ebenen Leinwand. Ursache hierfür könnte eine nicht ordentlich korrigierte Verzeichnung in den Bildern sein, die im Aussenbereich der Bilder immer am grössten ist (vgl. Tabelle 1, Kapitel 3.2.2). Weitere Gründe für schlechte Geometrien der Punktwolken sind schlechte Aufnahmekonfigurationen. Erfolgt die Aufnahme einer Fassade, nur mit

überlappenden Schräg-, bzw. Orthogonalaufnahmen wie in Abbildung 52, bei der übergreifende Aufnahmen zur Stabilisierung fehlen, so ist häufig eine Verschwenkung oder Drift in der Punktwolke ersichtlich. Die Abbildung 52 zeigt die Ansicht der HXE-Nordfassade von oben, erstellt aus dem Datensatz der Videobefliegung. Es wurden nur 23 Bilder der Fassadenschrägaufnahme verwendet. Verdeutlicht wird die falsche, gekrümmt rekonstruierte Geometrie der eigentlich ebenen Fassade. Die Ursache kann zum einen in fehlenden übergreifenden Aufnahmen liegen, was zu einer Drift in der Fassadentiefe als Folge schlechter Schnittgeometrien in der Bündelblockausgleichung führen kann. Zum anderen ist aber wohl auch eine schlechte Verzeichnungskorrektur der Bilder die Ursache.

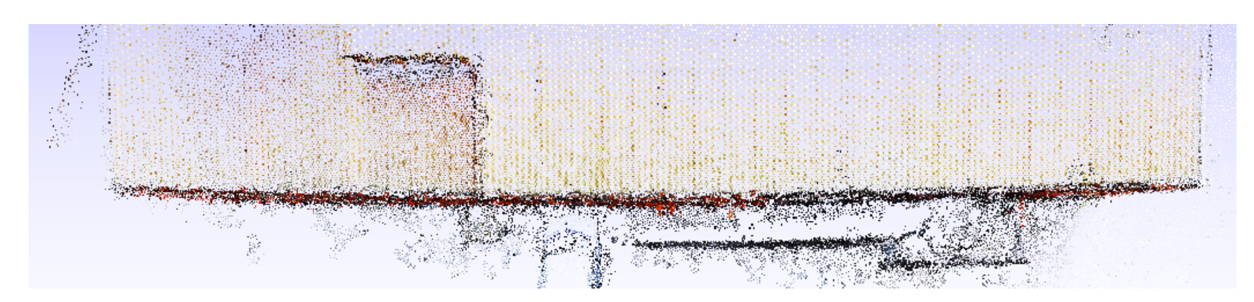


Abbildung 52: Draufsicht HXE-Nordfassade, Basis: verzeichnungsbehaftete Bilder (Photosynth: HXE_Flug0511_0004_0026)

Eine Rekonstruktion des Objektes aus unterschiedlichen Perspektiven hingegen, wie in Kapitel 7.1.3 verdeutlicht, führt zu einer stabilen Geometrie. Abbildung 53 zeigt ebenfalls das HXE-Gebäude. Gegenüber der Auswertung, die in Abbildung 52 dargestellt ist, wurden aber zusätzlich zu den Schrägaufnahmen alle Bilder der in Abbildung 36 dargestellten Kamerapositionen, verwendet. Somit ist das Objekt den Vorgaben zur Bildaufnahme entsprechend Kapitel 7.1.3 erfasst und besitzt eine ebene Fassade.

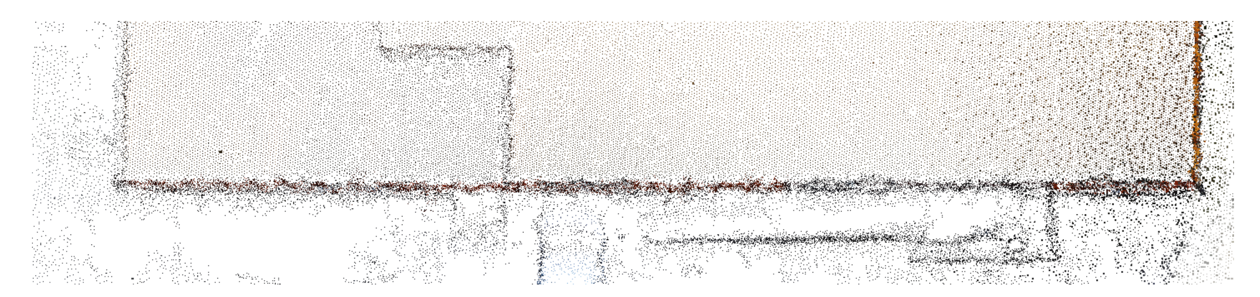


Abbildung 53: Draufsicht HXE-Nordfassade, Basis: verzeichnungsbehaftete Bilder (Photosynth: HXE_Flug_4_70u114_207).

Dass Verzeichnungen in den Bildern einen grossen Einfluss auf die Geometrie haben, zeigt Abbildung 54. Hier ist der gleiche Datensatz, wie bei Abbildung 52 prozessiert worden, jedoch wurden die Bilder vor dem hochladen zu Photosynth in Matlab verzeichnungskorrigiert (vgl. 4.4). Die konvexe Form der Fassade ist in der Folge nicht mehr vorhanden. Die Punktdichte ist um ein Vielfaches erhöht, da aufgrund einer besseren Orientierung der Bilder ein erfolgreicheres Dense-Matching durchgeführt wird. Von ca. 65 000 Punkten ist die Zahl der rekonstruierten Punkte auf fast 370 000 angestiegen.



Abbildung 54: HXE-Nordfassade von oben, rekonstruiert aus vorab entzerrten Bildern der Schrägaufnahme (Photosynth: Flug_0511_0004_0026_Matlab)

Ein Vergleich der von Photosynth berechneten Kameraparameter des auf den verzeichnungsbehafteten Originalbildern beruhenden Projekts mit dem Projekt, in das die mit Matlab verzeichnungskorrigierten Bilder eingeführt wurden, ist im Anhang in Tabelle 10 aufgeführt. Hier zeigt sich, dass die Werte der Brennweite und der Verzeichnung innerhalb eines Projekts unterschiedlich sind, obwohl alle Bilder mit den gleichen Einstellungen gemacht wurden. Des weiteren ist ersichtlich, dass die Standardabweichung der von Photosynth berechneten Fokussierungen zwar ähnlich ist, die Standardabweichungen der Verzeichnungsparameter k1 und k2 beim verzeichnungskorrigierten Projekt aber um den Faktor 3 kleiner sind. Die Parameter der verzeichnungskorrigierten Bilder erfahren also in Photosynth zwar immer noch eine Veränderung, diese ist aber minimiert.

Eine weitere Ursache für falsche Geometrien könnte in der Vorgehensweise des Programms Photosynth beim Matching mittels SIFT zu finden sein, und wird von Dang Trung et al. (Kien, Worring, & Dorst, 2009) als SIFT-Drift bezeichnet. Wie in Abbildung 55 dargestellt, ist der Effekt der Tatsache geschuldet, dass das Zentrum eines Kreises und der Schwerpunkt seiner Abbildung nur bei orthogonaler Draufsicht übereinstimmen. Bei einer perspektivischen Abbildung wird der Kreis zur Ellipse und der echte Kreisschwerpunkt liegt hinter dem Zentrum der Ellipse. SIFT und andere Blob-Detektoren (=Detektoren die punktartige Keypoints extrahieren) arbeiten ähnlich wie Zentroidoperatoren und generieren den Featurepunkt immer im Schwerpunkt der Abbildung. Somit stellen in perspektivisch verzerrten Bildern als identisch deklarierte Featurepunkte nicht die gleichen realen Punkte dar. Je grösser die Fläche und der Winkel der perspektivischen Verzerrung, desto grösser ist die Distanz zwischen Schwerpunkt und echtem Zentrum der Fläche.

Die Folgen für die 3D-Geometrie werden aus Abbildung 56 ersichtlich. Wenn die Kamerapositionen (C_1, C_2) bekannt sind, so wird durch Rückprojektion durch die angenommenen Featurepunkte (K_1, K_2) der Schnittpunkt (S) hinter der echten Struktur liegen. Vice versa: wenn die Featurepunkte fälschlicherweise als richtig angenommen werden, sodass K_1 und K_2 identisch liegen, so wird die Kameraposition der zweiten Aufnahme (C_2‘) näher an der Referenzaufnahmeposition C_1 liegen.

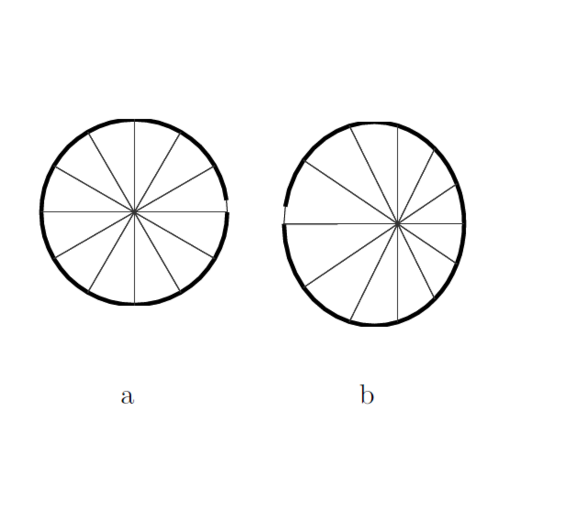


Abbildung 55: Darstellung des Mittelpunktes eines Kreises in orthogonaler (a) und perspektivischer Ansicht (b).

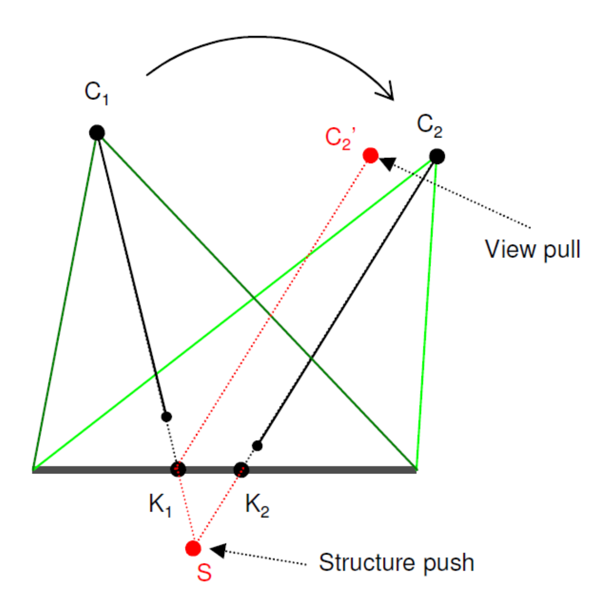


Abbildung 56: Verdeutlichung des SIFT-Drift-Effekts bei einer 3D-Rekonstruktion. (Kien, Worring, & Dorst, 2009)

Da Bundler für die Berechnung der relativen Orientierung auf den SIFT-Algorithmus aufbaut, müssten die relativen Kamerapositionen zwischen einem Bildpaar fehlerbehaftet sein. Inwieweit die Fehler im

Rahmen der Bündelblockausgleichung, bei der die Featurepunktmessungen bildpaarübergreifend eingeführt werden, kompensiert werden können, hängt meines Erachtens von der Geometrie der Aufnahmepositionen ab. Bei einer Umrundung eines Objektes, beispielsweise auf einer Kreisbahn mit gleichen Zwischenwinkeln zwischen den Aufnahmen, müsste sich der Einfluss der durch die SIFT-Drift entstandenen Fehler zumindest in den berechneten Kamerapositionen aufheben.

Für das Matching von Featurepunkten im Rahmen von PMVS müsste sich der SIFT-Drift-Effekt ein zweites Mal auswirken. Mit der Folge, dass die erstellten Punkte weiter von den Kamerazentren entfernt liegen müssten als tatsächlich. Ein Vergleich der aus Photosynth erstellten Punktwolken mit denen in Photosynth Toolkit erstellten Punktwolken ist leider nicht aussagekräftig. Der in Abbildung 57 dargestellte Vergleich zeigt lediglich, dass die vermaschte Toolkit-Punktwolke des Datensatzes HXE_Flug0511_0004_0026 mittig in der mit mehr Rauschen versehen Photosynth Punktwolke liegt. Blau eingefärbt sind die vor dem Gebäude befindlichen Punkte, gelb-rot sind die im Gebäude liegenden Punkte. Ob mehr Punkte der original Photosynth Punktwolke oberhalb des Daches liegen, und somit die in Abbildung 56 gemachte Aussage stützen, kann nicht bestätigt werden.

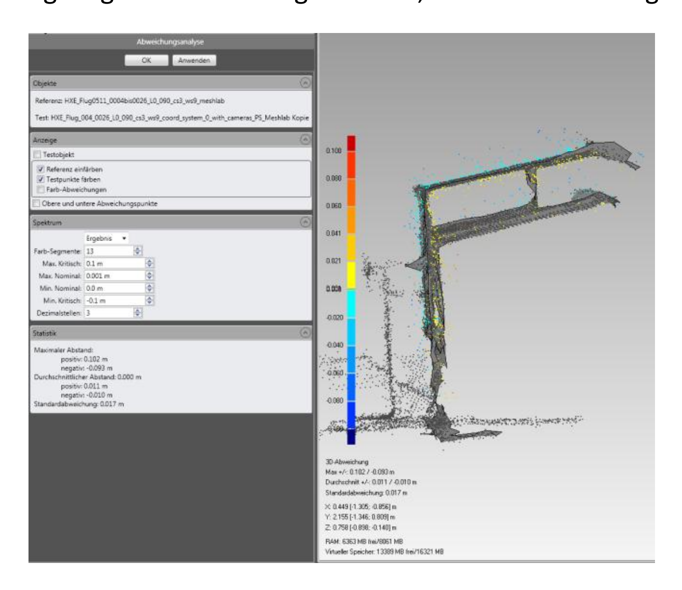


Abbildung 57: Vergleich zwischen vermaschter Photosynth-Toolkit-Wolke(grau) und original Photosynth Punktwolke (farbig)

Der Hauptgrund für Ungenauigkeiten in der Geometrie und Rekonstruktionsfehler wie Rauschen oder fehlerhafte Einfärbung der Punkte, dürfte mit grösster Sicherheit an verzeichneten Bildern und schlechten Aufnahmegeometrien liegen. Diese können zu Fehlern beim sukzessiven Aneinanderhängen der Bilder im Prozess des Matching führen. Ist kein Schleifenschluss vorhanden, so können sie nicht kompensiert werden. Eine weitere Fehlerursache könnte im automatischen Matching zu finden sein. Die gematchten Punkte bilden als Bildmessungen die Basis für die Bündelblockausgleichung in Photosynth. Sie besitzen wegen möglicher fehlerhafter Matches nicht die Zuverlässigkeit eines Operators. Automatische Matchingfehler müssten sich in der Güte der Bündelblockausgleichung niederschlagen. Es konnten hierfür weder eigene Untersuchungen angestellt werden, noch Genauigkeitsaussagen in den Photosynthdaten ausgemacht werden. Ein angedachter Vergleich der von Photosynth berechneten Kameraparameter mit den Parametern der eigenen, im Programm Australis durchgeführten Kalibrierung, war nicht möglich.

8.3.4 Beispiele von Rekonstruktionsfehlern

Aufgrund der Erstellung von vielen unterschiedlichen Modellen aus unterschiedlichen Datensätzen kann eine grosse Anzahl von Rekonstruktionen betrachtet werden. Hierbei sind immer wieder ähnliche Fehler zu sehen, die im Folgenden kurz an Beispielbildern dargestellt werden.

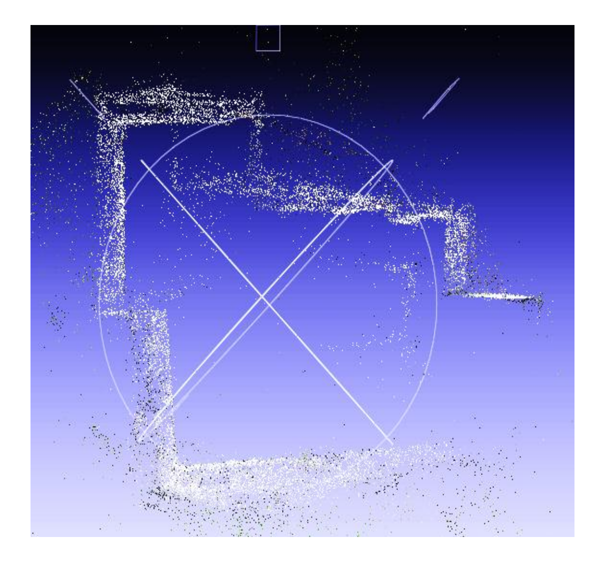


Abbildung 58: Fehlerhafte Geometrie (Photosynth: Architekten Haeuschen, Handaufnahme)

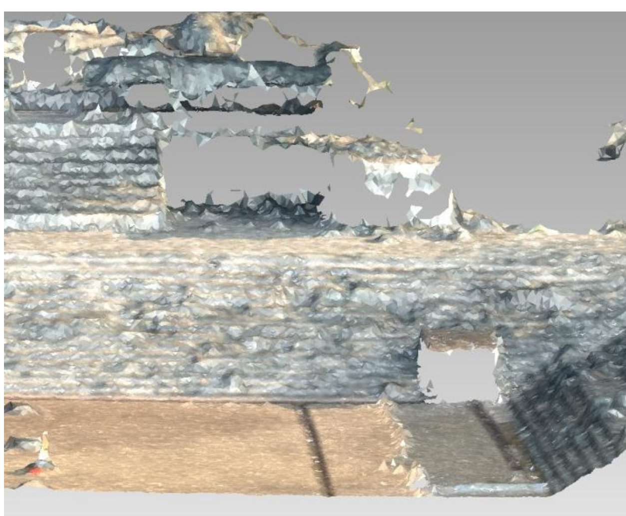


Abbildung 59: Fehlerhafte Punkte entlang von Schattenkanten (Photosynth: Copan)

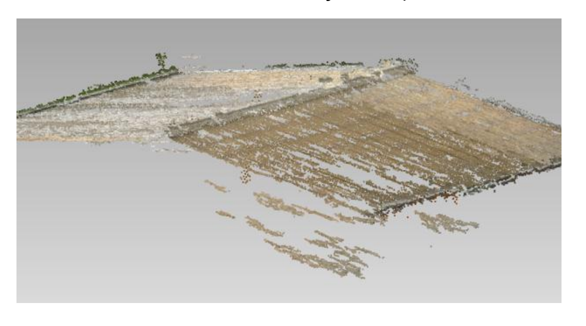


Abbildung 60: Fehlerhafte Patches, bei repetitiven Mustern (Photosynth: HXE_MPA_816_847_div_Schraeg)



Abbildung 61: Fehlerhafte Punkte in Lage und Farbe an Kanten und dünnen Objekten (Photosynth: Krattingen)

Abbildung 58 zeigt eine fehlerhafte Geometrie am Beispiel des von oben betrachteten HXD-Datensatzes. Zu sehen ist die Draufsicht auf die Aussenwände des HXD-Gebäudes, die in Wirklichkeit rechtwinkelig zueinander stehen. Eine Ursache für die falsche Geometrie ist sicherlich in der Verwendung verzeichneter Bilder und in einer schlechten Aufnahmegeometrie, ohne geometrieverstärkende übergreifende Bilder und ohne Schleifenschluss zu finden. Der Schleifenschluss konnte nicht vollzogen werden, da Vegetation in einem Bereich des Gebäudes vorhanden ist. Die Bilder dieses Teilbereichs konnten nicht gematcht werden, was die Lücke in der Rekonstruktion erklärt.

Abbildung 59 zeigt eine Rekonstruktion einer antiken Stätte in Copan. Der Platz zu Füssen der Tribüne ist, bis auf die Entwässerungsrinne in Wirklichkeit eben. Rechts der Entwässerungsrinne ist entlang der dort befindlichen Schattenkante eine falsche Rekonstruktion von 3D-Punkten erfolgt, die sich in einer Unebenheit der vermaschten Oberfläche zeigt.

Abbildung 60 zeigt einen Ausschnitt des Daches des HXE-Gebäudes, wie es aus den nicht verzeichnungskorrigierten Bildern des HXE-Datensatzes rekonstruiert wurde. Die unterhalb des

Daches befindlichen Flächen sind falsch rekonstruierte Patches, die zwischen fehlerhaft gematchten Featurepunkten im Zuge der Expansion gebildet wurden.

Abbildung 61 zeigt den Datensatz Krattingen. Die über der Landschaft schwebenden grünen Linien, sind im Zuge des Dense-Matching falsch, den über dem Grundstück verlaufenden Hochspannungsleitungen, zugeordnete Bodenpunkte der Vegetation. Ein Grund hierfür kann die Bewegung der Hochspannungsleitungen wegen Windes während der Aufnahme sein, die zu falschen Geometrien bei der Rückprojektion führt. Sicherlich trägt auch die Verwendung von nicht verzeichnungskorrigierten Bildern zu den Fehlern bei. Die Verzeichnungen haben Einfluss auf das Matching und somit auf die Bündelblockausgleichung und die darin berechneten Kamerapositionen und Kameraparameter. Ebenso wirkt sich eine schlecht behobene Verzeichnung beim Dense-Matching aus.

8.3.5 Verzeichnungen

Die Auswertung aller Datensätze mit Bildern, deren Kameraverzeichnung nicht korrigiert wird, weisen viele Fehler, wie unter den vorhergehenden Unterkapiteln von 8.3 beschrieben, auf. Die konvexe Form langgestreckter Objekte, wie an der HXE-Fassade in Abbildung 52 zu sehen, könnte ihre Ursache in nicht oder nur unzureichend korrigierten Verzeichnungen haben.

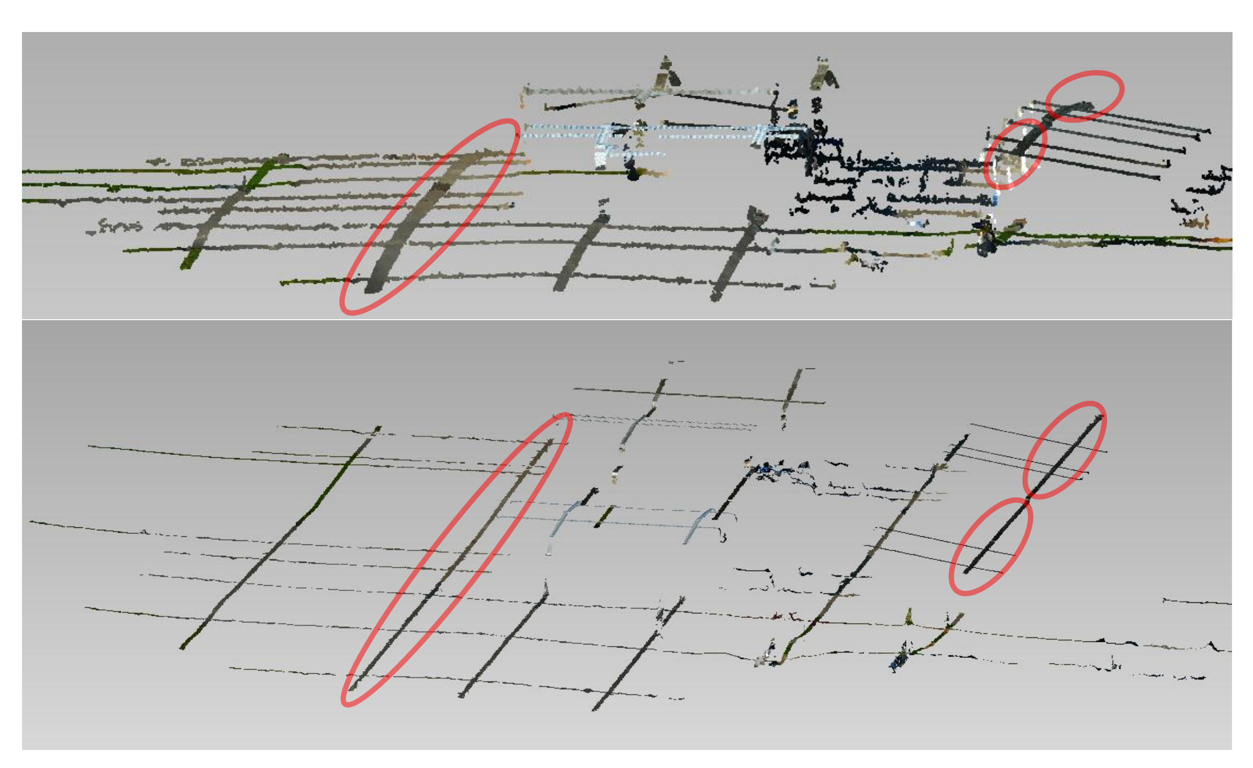


Abbildung 62: Schnitte von Photosynthmodellen basierend auf unkorrigierten Originalbildern (o.), bzw. verzeichnungskorrigierten Bilder (u.)

Um zu sehen, ob die rekonstruierten Punktwolken, auf Grundlage von verzeichnungskorrigierten Bildern besser sind, wird nach langer Suche eines geeigneten Programms eine Verzeichnungskorrektur mit Matlab durchgeführt. Sie ist unter Kapitel 4.4 beschrieben.

Die anschliessend auf Grundlage korrigierter Bilder mit Photosynth und Photosynth Toolkit prozessierten Daten führen zu deutlich verbesserten Modellen. Zum einen sind die Punktwolken, die mit Photosynth Toolkit erstellt werden, viel dichter. Zum anderen weisen sie auch ein geringeres Rauschen auf. Fehlerhafte Patches aufgrund sich wiederholender Strukturen sind stark minimiert. Die

konvexe Form, die bisher in langgestreckten Objekten zu sehen war, ist verschwunden. Abbildung 62 zeigt Schnitte durch zwei Modelle des Datensatzes Duebendorf (oben: Duebendorf_058_091, unten: Duebendorf_58_91_Matlab). Im oberen Modell, das mit Bildern ohne Matlab-Verzeichnungskorrektur erstellt wurde, ist die konvexe Form in den markierten, nach hinten laufenden Schnitten gut zu erkennen. Im unteren Modell hingegen, das auf Basis in Matlab verzeichnungskorrigierter Bilder erstellt wurde, ist die Gradlinigkeit der in Wirklichkeit ebenen Objekte zu sehen. Die langgestreckten Ellipsen fassen einen Schnitt durch den Runway ein, die beiden nebeneinanderliegenden Ellipsen, sind im Bereich eines ebenen Daches, das zwischen den Ellipsen einen Höhensprung besitzt.

Photosynth Toolkit arbeitet eigentlich mit Bildern, deren Verzeichnung es korrigiert. Das Programm nutzt hierfür die Kameraparameter (c, k1, k2), die von Photosynth ausgegeben werden, wo sie mittels Autokalibration im Rahmen der Bündelblockausgleichung ermittelt wurden. Im Zuge der Prozessierung werden in Photosynth Toolkit die Originalbilder auf Grundlage der Photosynth-Parameter verzeichnungskorrigiert. Anschliessend wird mit bereinigten Bildern das Dense-Matching durchgeführt. Der Vergleich eines Originalbildes und eines von Bundler verzeichnungskorrigierten Bildes wurde bereits in Abbildung 27 dargestellt und ist für Photosynth Toolkit ähnlich. Trotzdem sind in den rekonstruierten Punktwolken Fehler in der Geometrie, wie Abbildung 62 (oben) dargestellt, die auf eine mangelnde Verzeichnungskorrektur hindeuten. Das erneute Einführen der entzerrten Bilder in den Photosynth Prozessierungsprozess, führt nicht zu einer sichtbaren Verbesserung der beanstandeten, konvexen Geometrien in der Blickrichtung der Kamera. Der Grund hierfür scheint zu sein, dass die Autokalibrierung vom Vorhandensein und der Verteilung der Featurepunkte in den Bildern abhängig ist. In Bereichen, wo wenige oder keine Featurepunkte zwischen den Bildern gematcht werden, z.B. im Aussenbereich der Seitenstreifen einer Blockbefliegung, kann die Autokalibrierung Schwächen aufweisen. Schwächen zeigen sich auch darin, dass die im Zuge der Bündelblockausgleichung mit Photosynth ermittelten Brennweiten unterschiedlich sind, auch wenn sie alle mit der gleichen Brennweite aufgenommen wurden. Dies kann anhand der im Zuge der Prozessierung mit Photosynth Toolkit heruntergeladenen Datei „coord_system_0_cameras.txt“ im *bin*-Ordner gesehen werden. Die Struktur ist dabei derjenigen von Bundler entsprechend. Sie wird in Tabelle 4 dargestellt. In Tabelle 5 sind nur die Werte der inneren Orientierung (f, k1, k2) einer solchen Kameraparameterdatei dargestellt. Zu sehen ist, dass sich die Werte unterscheiden, obwohl die Bilder schnell nacheinander mit den gleichen Kameraeinstellungen gemacht wurden.

`<f> <k1> <k2>`	Brennweite und zwei radiale symmetrische Verzeichnungsparameter
`<R>`	3x3 Matrix mit der Kamerarotation
`<t>`	3x1 Vektor mit der Kameratranslation

Tabelle 4: Datenstruktur der Kameradatei aus Photosynth

Bild	f	k1	k2
4	0,764586	0,001196	-0,001202
5	0,761799	-0,000157	0,000156
6	0,761405	0,001618	-0,001633
7	0,759260	-0,000224	0,000225
8	0,760407	0,001762	-0,001779

Tabelle 5: Kameraparameter von 5 Bildern im Videomodus aus Photosynthprojekt, Einheiten unbekannt

Die in der eigenen Kamerakalibrierung unter 3.2.2 dargestellten Parameter zeigen auf Grund der grossen Schwankungen in den Verzeichnungskoeffizienten von Photosynth keine Übereinstimmung mit diesen. Eine Umrechnung der Fokuslänge in Pixel oder Inch führt nicht zu halbwegs ähnlichen Werten.

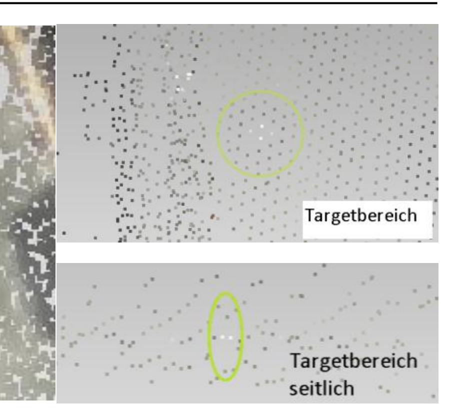
9 Vergleich zu Testdaten

Um die mit Photosynth und Photosynth Toolkit erhaltenen 3D-Punktwolken nicht nur optisch, sondern auch geometrisch bewerten zu können, wurden ein Vergleich anhand bestehender Daten durchgeführt. Aus einer früheren Arbeit des Autors im Rahmen des Geomatik-Seminars und der Masterprojektarbeit (Ober, 2010, S. 46 ff.), gibt es vom Gebäude HXE bereits eine georeferenzierte 3D-Punktwolke, die mittels terrestrischem Laserscanning gewonnen wurde. Um die 3D-Punktwolken der Photosynth-Methode mit der georeferenzierten Scanpunktwolke vergleichen zu können, ist zunächst eine Transformation nötig.

9.1 Transformation der Punktwolke

Aus Photosynth heraus ist die Punktwolke nur relativ orientiert, in einem Rahmen der sich aus der Wahl des Ausgangsbildpaares des Matching ergibt. Die Punktwolke, die nach dem Dense-Matching mit Photosynth Toolkit entsteht, ist im gleichen Koordinatensystem wie die Original Photosynth-Punktwolke. Um zu sehen, wie masshaltig und geometrisch richtig die mit Photosynth und Photosynth Toolkit erstellten Punktwolken sind, wurde auf den bestehenden Bilddatensatz des HXE-Gebäudes zurückgegriffen (HXE_MPA_816_847_div_Schraeg). In den hochaufgelösten Bildern sind auch Targets abgelichtet, die im übergeordneten Landessystem LV 95 eingemessenen sind. Die Bilder werden zur Erstellung eines Photosynths hochgeladen. Nach nur 20 Minuten ist die Prozessierung mit Photosynth abgeschlossen und die relative Orientierung der Kamerapositionen sowie eine Punktwolke, die die Szene bereits gut erkennen lässt, vorhanden. Das Dense-Matching mit Toolkit kann mit allen Bildern nur in Level 1 durchgeführt werden (vgl. Tabelle 3). Beim dichtesten Level 0 ist auch nach 5 Tagen noch kein Ergebnis in Form einer Punktwolke vorhanden, die Prozessierung wird daraufhin abgebrochen. Auch in der Punktwolke des Level 1 Dense-Matching können teilweise die ausgelegten Targets und natürliche Passpunkte erkannt werden und ihre lokalen Koordinaten erfasst werden. Abbildung 63 links zeigt ein Target, das in Natur aus einer ca. 27 cm Durchmesser grossen schwarzen Scheiben mit einem zentrisch aufgebrachten weissen Inneren mit 9 cm Durchmesser besteht. Mittig ist es in der rekonstruierten 3D-Punktwolke zu erkennen. Rechts ist die Punktwolke stark vergrössert. Die einzelnen Pixel der Targetrekonstruktion sind zu erkennen. Rechts oben im grün markierten Bereich ist die weisse Innenfläche mit ca. 4 Punkten und die schwarze Umrandung mit ca. 40 Punkten zu sehen. Die manuelle Koordinatenerfassung erfolgt deshalb teilweise auf Mittelbildung beruhend. Rechts unten ist eine Seitenansicht dargestellt. In der vertikalen Ausdehnung liegen die Punkte oft in unterschiedlichen Höhen, weshalb auch hier eine Anpassung an den Durchschnitt, bzw. die nähere Umgebung, in dessen Höhe die Targets liegen, manuell erfolgt.





Originalaufnahme des Targets

Ferne Darstellung in der Punktwolke

Nahe Darstellung von oben und seitlich

Abbildung 63: Targetdarstellung im Original und in der Punktwolke

Es werden die lokalen Koordinaten von mehreren Targetpunkten und natürlichen Passpunkten erfasst. Bei der Auswahl der Punkte ist auf eine gute Verteilung in Lage und Höhe im zu transformierenden Raum zu achten. Werden diese Grundsätze der Transformation nicht beachtet, so kann es zu Fehlern des transformierten Modells in ausserhalb der Passpunkte liegenden Bereichen kommen, die auf einer Extrapolation beruhen und sich z.B. in einer Verkippung zeigen.

Mit dem Freeware-Transformationsprogramm Java Graticule 3D [13] (JAG3D) wird eine Transformation der gemessenen Punkte auf die von diesen Passpunkten ebenfalls vorhandenen Landeskoordinaten berechnet.

Zunächst wird eine 9-Parameter-Transformation berechnet. Hierbei werden 2 Ausreisser in den Passpunkten entdeckt und daraufhin nicht mehr berücksichtigt. Des weiteren zeigt die 9-Parameter-Transformation wie erwartet, dass die Werte der drei Massstäbe der drei Koordinatenrichtungen alle ähnlich sind. Deshalb wird schlussendlich eine 7-Parameter-Transformation mit 9 Passpunkten berechnet.

Die Ergebnisse der Transformation sind in Tabelle 6 dargestellt. Entscheidend sind vor allem die Verschiebungen (∇Y,∇X,∇H) der transformierten Koordinaten gegenüber den Sollkoordinaten der Passpunkte. Hier weisen die Abweichungen der in Landeskoordinaten transformierten Punkte in allen drei Koordinatenachsen maximale Werte von 5 cm auf.Die Standardabweichungen (σY,σX,σH) der transformierten Punkte sind in allen Achsrichtungen im Bereich von 1 cm. Punkt 0, hat die höchsten Standardabweichungen aufzuweisen - im Höhenwert 2 cm.

Punktnum...	Rechts Y [m]	Hoch X [m]	Höhe H	σY [m]	σX [m]	σH [m]	∇Y [m]	∇X [m]	∇H [m]
0	680563.641...	251312.376...	522.288...	0.013689	0.013677	0.019004	0.0206...	-0.053...	0.0140...
2	680580.765...	251280.662...	527.209...	0.007493	0.007569	0.007410	-0.008...	0.0071...	0.0398...
3	680559.371...	251284.886...	522.546...	0.010019	0.010029	0.011746	-0.004...	0.0100...	-0.034...
4	680559.108...	251266.810...	522.105...	0.011135	0.011140	0.013543	-0.043...	0.0180...	0.0170...
PTPS515	680601.795...	251292.998...	522.721...	0.010954	0.010963	0.013136	-0.018...	0.0019...	0.0060...
5	680575.132...	251265.016...	522.614...	0.009219	0.009212	0.011165	0.0062...	-0.008...	-0.031...
6	680578.946...	251266.567...	522.613...	0.008788	0.008782	0.010462	0.0185...	-0.012...	0.0315...
STPS23	680603.585...	251285.028...	522.462...	0.010755	0.010771	0.012688	0.0450...	-0.002...	0.0099...
STPS514	680596.903...	251278.615...	522.863...	0.009233	0.009242	0.010532	-0.012...	0.0284...	-0.047...

Tabelle 6:Ergebnis der 7-Parametertransformation anhand der 9 eingeführten Passpunkte.

Diese Ergebnisse stellen aufgrund der Dichte der Punktwolke und des vorhandenen Rauschens, die zu nur vage auszumachenden Passpunkte führen, ein überraschend gutes Ergebnis dar. Es zeigt, dass

[13] JAG3D, Transformationsporgramm von Michael Lösler, Info: http://derletztekick.com/software, Stand: 27.01.2011

die mit der Photosynth-Toolkit-Methode erstellte Punktwolke geometrisch richtig ist, was durch die kleinen Standardabweichungen der Transformationsparameter in Tabelle 7 bestätigt wird.

	Transformationsparameter	Standardabweichung σ_{par}
M	35.2916140512	0.0116918777
R_x	0.3187174849	0.0004588948
R_y	0.0042128548	0.0004873172
R_z	5.8619766182	0.0003320722
T_x	251277.5505298695	0.0212023514
T_y	680573.1117492832	0.0186606138
T_z	561.9518633371	0.0151963987

Tabelle 7: Transformationsparameter der ungewichteten 7-Parameter-Transformation

Die gesamte Punktmenge wird daraufhin mit den Transformationsparametern ins Landeskoordinatensystem transformiert. Da für die Berechnung die Punkte ohne ihre Farb- und Normalenwerte in JAG3D eingelesen werden müssen, werden anschliessend den transformierten Punkten die ursprünglichen Farb- und Normalenwerte wieder zugewiesen und erneut eine PLY-Datei erstellt. Eine gute Anleitung zur Vorgehensweise bei der Transformation von Photosynth Punktwolken zu georeferenzierten Punktwolken ist von Craig verfasst worden (Craig, 2010).

Aufgrund der grossen Punktmenge von über 800 000 zu transformierenden Punkten ist das Datenhandling zeitaufwändig und muss teilweise blockweise erfolgen. Um die Transformation in JAG3D mit der grossen Punktmenge durchführen zu können, muss der virtuelle Speicherplatz, der vom Programm belegt werden darf, in der Batch-Datei manuell erweitert werden. Die Vorgehensweise hierzu ist auf im Diskussionsforum von JAG3D festgehalten[14], die manipulierte Batch-Datei im Anhang beigefügt. Alternativ kann die Transformation auch in Punktblöcken durchgeführt werden, um nicht zu viel virtuellen Speicherplatz zu belegen.

9.2 Geometrietests

Die transformierte Punktwolke des HXE_MPA_816_847_div_Schraeg Datensatzes wird mit dem Programm Geomagic Qualify 12 mit der unter Kapitel 9 genannten, vermaschten Laserscanpunktwolke verglichen. Einschränkend muss vorab gesagt werden, dass die Qualität des Laserscanmodells im Dachbereich nicht gewährleistet ist, aufgrund von Problemen bei der Erfassung des HXE-Daches. Des weiteren ist zu erwähnen, dass keine manuelle Bereinigung der Toolkit-Punktwolke stattgefunden hat, bei der offensichtlich falsche Punkte hätten gelöscht werden können. Ein flächiger Vergleich, der nicht auf einzelne fehlerhafte Punkte eingeht, ist deshalb der richtige Ansatz um die Toolkit Punktwolke beurteilen zu können. Der in Abbildung 64 dargestellte Vergleich zeigt in den flächigen Bereichen des kiesigen Vorplatzes gute Übereinstimmungen von +/- 5 cm. Die dunkelblaue Linie vor der Westfassade, verläuft entlang des Gebäudeschattens und zeigt, dass in diesem kontraststarken Bereich falsche Punkte mit der Toolkitmethode erstellt werden. Ebenso fallen die dunkel eingefärbten Punkte entlang der Gebäudekanten auf, die das in Abschnitt 8.3.1 beschriebene Rauschen präsentieren. Die ovale blaue Linie, die unmittelbar rechts vor der Westfassade gelegen ist, wie auch andere linienhafte Abweichungen auf dem Vorplatz sind jedoch mit Fahrzeugen zu begründen, die bei der Bildaufnahme vorhanden, beim Laserscan aber nicht vorhanden waren.

[14] http://forum.derletztekick.com/index.php?id=1355, Stand: 27.01.2011

Die grösstenteils grün dargestellten Fassadenbereiche, die sich auf allen Seiten des Gebäudes finden, zeigen, dass die Geometrie der beiden Punktwolke in sich stimmen muss. Das bedeutet, dass die beiden rekonstruierten Gebäudekörper die gleiche Ausdehnung haben und sich an der gleichen Lage befinden. Die aufgrund der Transformationsergebnisse erhaltene Genauigkeit im Bereich von +/-5 cm zeigt sich auch für einen Grossteil der übrigen Punkte. Schwierig ist es aber, ohne ein Referenzmodell Fehler zu entdecken. Im rechten Bildbereich, wo sich eine zur Strasse hinaufführende Treppe befindet, ist eine blaue Fläche zu sehen, die eine rote überlagert. Die beiden Flächen befinden sich also in Entfernungen von mehr als 20 cm über und unter der tatsächlichen Treppenoberfläche. Im dichtgematchten Modell erkennt man, dass die Treppenstufen in zwei Lagen übereinander erstellt sind. Die Ursache für den Fehler ist wahrscheinlich in der sich wiederholenden Struktur der Treppen begründet. Gleiches wird auch für die schlecht passenden, rekonstruierten Dachflächen des HXE vermutet, mit ihrer einheitlichen Struktur. Das Dach des Nachbargebäudes, das in Ziegelbauweise errichtet ist, scheint besser zu stimmen. Hier gab es zusätzlich beim Scannen auch keine Probleme in der Erfassung, weshalb der Vergleich zum Laserscan in diesem Bereich belastbarer ist.

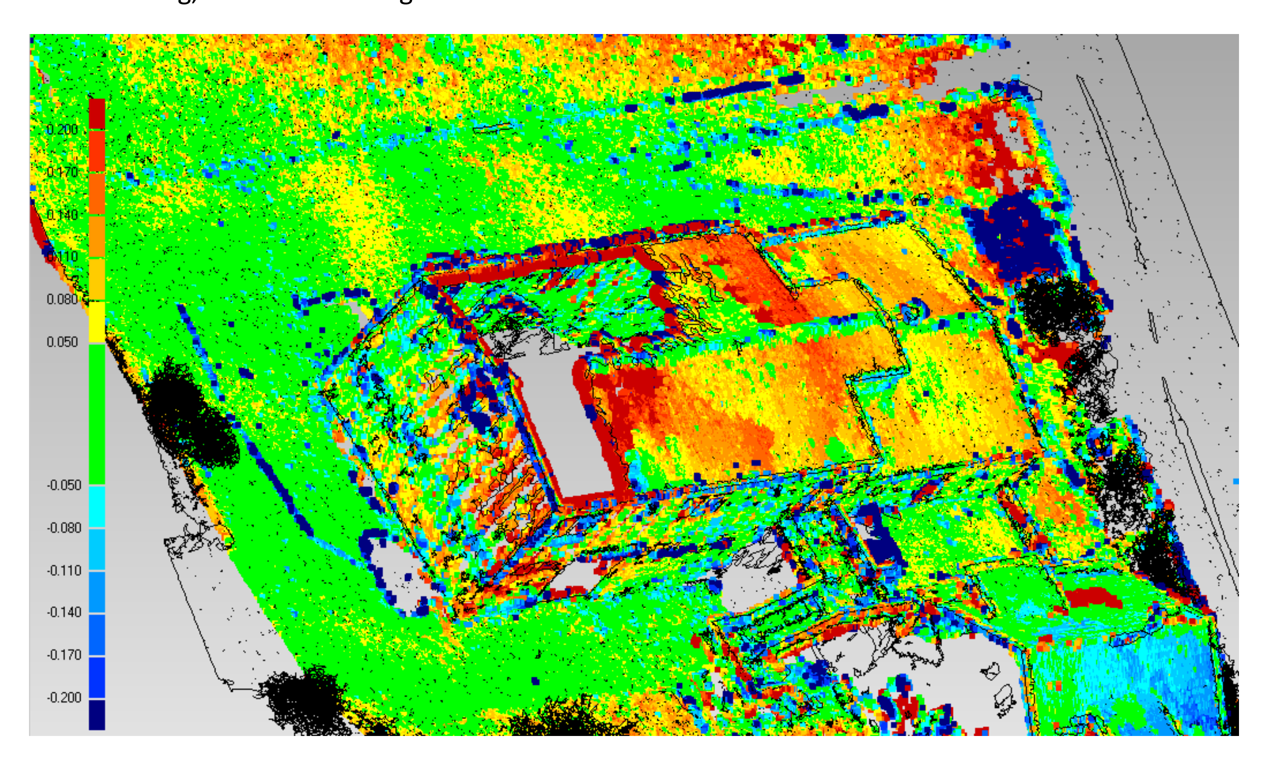
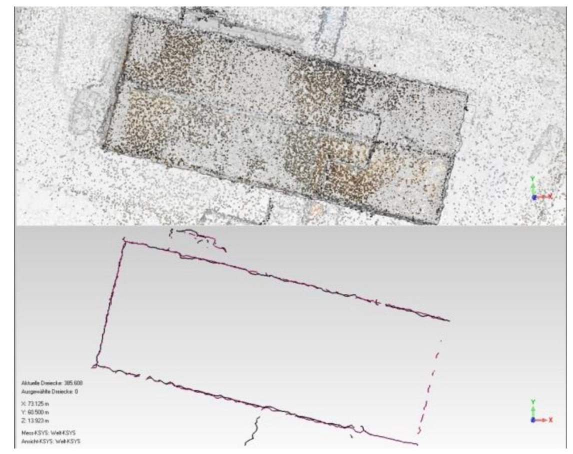


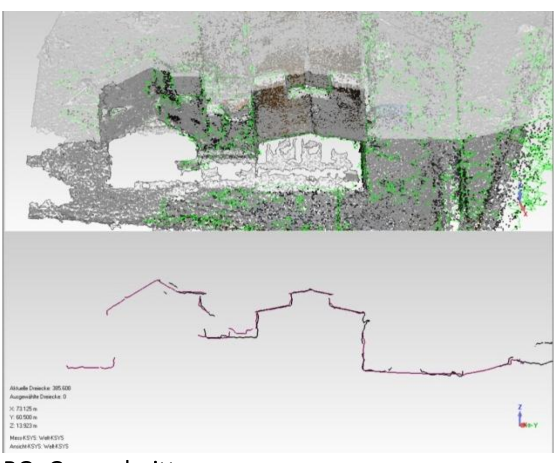
Abbildung 64: Vergleich Laserscanmodell zu Photosynth-Toolkit-Punktwolke, Einheit: [m]

Sind Punktwolken in identischen Koordinatensystemen enthalten, so können einfache Vergleiche zur Geometrie auch anhand von Schnitten durchgeführt werden. Die Bilder der Abbildung 65 zeigen jeweils gemeinsame Schnitte der vermaschten, aus dem Datensatz HXE_MPA_816_847_div_Schraeg entstandenen Punktwolke (violett) und der aus der Videobefliegung entstandenen, vermaschten Punktwolke des Datensatzes HXE_Flug_4_70u114_207 (schwarz). Die Lage der Schnitte ist im darüber abgebildeten Modell zu erkennen. Weil bei der Videobefliegung keine Targets ausgelegt wurden, wurde die aus der Videobefliegung erhaltene Punktwolke nur optisch in die über Passpunkte transformierte Punktwolke eingepasst. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung in der absoluten und relativen Lage der beiden Modelle zueinander. Beim genaueren Betrachten kann eine höhere Detailgenauigkeit bei den Schnitten der Videobildauswertung erkannt werden. Die Ursache hierfür ist in der umfassenderen Abbildung des Gebäudes während des Videorundflugs begründet. Diese hat zur Folge, dass das Gebäude fast überall rekonstruiert werden kann. Bei den zwar hochaufgelösten

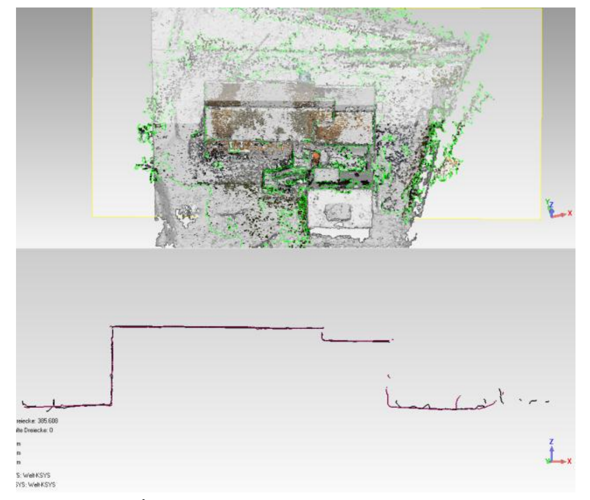
aber spärlicher vorhandenen Einzelbildern treten mehr Löcher in der Fassade auf, die aus den wenigen Bildern nicht ausreichend rekonstruiert werden können.



LO: Horizontalschnitt



RO: Querschnitt



LU: Längsschnitt

Abbildung 65: 3 Schnitte durch HXE-Modelle, Basis: hochaufgelöste Einzelbilder (violett) bzw. Videobefliegung (schwarz)

Ein direkter optischer Vergleich der beiden Modelle wird in Abbildung 66 gezeigt und ermöglicht es die Punktwolken, bzw. ihre vermaschten Modelle genauer zu betrachten. Er ist nur für das Gebäude und das angrenzende Gelände interessant, da der Videoflug nur darauf ausgelegt war. Im Dachbereich, der in beiden Datensätzen gut erfasst ist, ist der Vergleich wahrscheinlich am besten durchzuführen. Beide Dachflächen sind in grossen Bereichen sehr einheitlich, was vermuten lässt, dass die Bereiche mittels Dense-Matching zwischen wenigen Featurepunkten entstanden sind, wie in einer Art Interpolation. Im linken Modell sind aber Sprünge in der Dachfläche vorhanden während das rechte ziemlich glatt und somit fehlerfrei wirkt. Tatsächlich ist das Dachflächestruktur allerdings einem Wellblechdach gleichend, was das Dense-Matching allerdings nicht zu rekonstruieren im Stande ist. Die von ihm erstellten Punkte bilden, bis auf an den angesprochenen Sprüngen, eine Ebene. Die Westfassade zeigt sich im rechten Bild detailreicher und weniger von Rauschen beeinträchtigt als im linken Bild Die nicht ganz glatt rekonstruierten orangefarbenen Bereiche sind eigentlich eben. Der Vorplatz ist im linken Modell ebener, einzig die fehlerhaften Punkte entlang des Gebäudeschattens, die sich wie ein Gebirgsrücken darstellen, sind als Fehler auszumachen. Am Vorplatz der linken Aufnahme zeigt sich, dass die Geometrie für texturierte, waagrechte Flächen aus der Nadirbefliegung mit 75 Prozent Überlappung optisch gut aussieht.





Abbildung 66: HXE-Modelle, vermascht in Geomagic, Basis: hochaufgelöste Einzelbilder (li.) bzw. Videobefliegung (re.)

An vorhandenen Bildern der Bachelorarbeit von Gabriel Flury (Flury, 2009), sollte ein grossflächiger Vergleich zwischen zwei Datensätzen einer Kiesgrube, die zu unterschiedlichen Zeiten mittels Befliegung gewonnen wurden, erstellt werden. Ziel war es, das abgebaute Kiesvolumen berechnen zu können um es mit den Werten von Flury zu vergleichen. Die Prozessierung der beiden Datensätze mittels Photosynth Toolkit funktionierte trotz fast 100 hochaufgelöster Bilder problemlos in Level 1. Die Überführung der beiden Punktwolken in ein Koordinatensystem konnte nicht erfolgen, da leider zum einen die in den Punkwolken ersichtlichen Passpunkte in den beiden Bildsätzen nicht identisch waren und zum anderen die Passpunktkoordinaten nicht verfügbar waren. Auf eine optische Einpassung der einen in die andere Punktwolke wurde aufgrund der schwierigen Erfassung identischer Punkte oder Formen verzichtet.

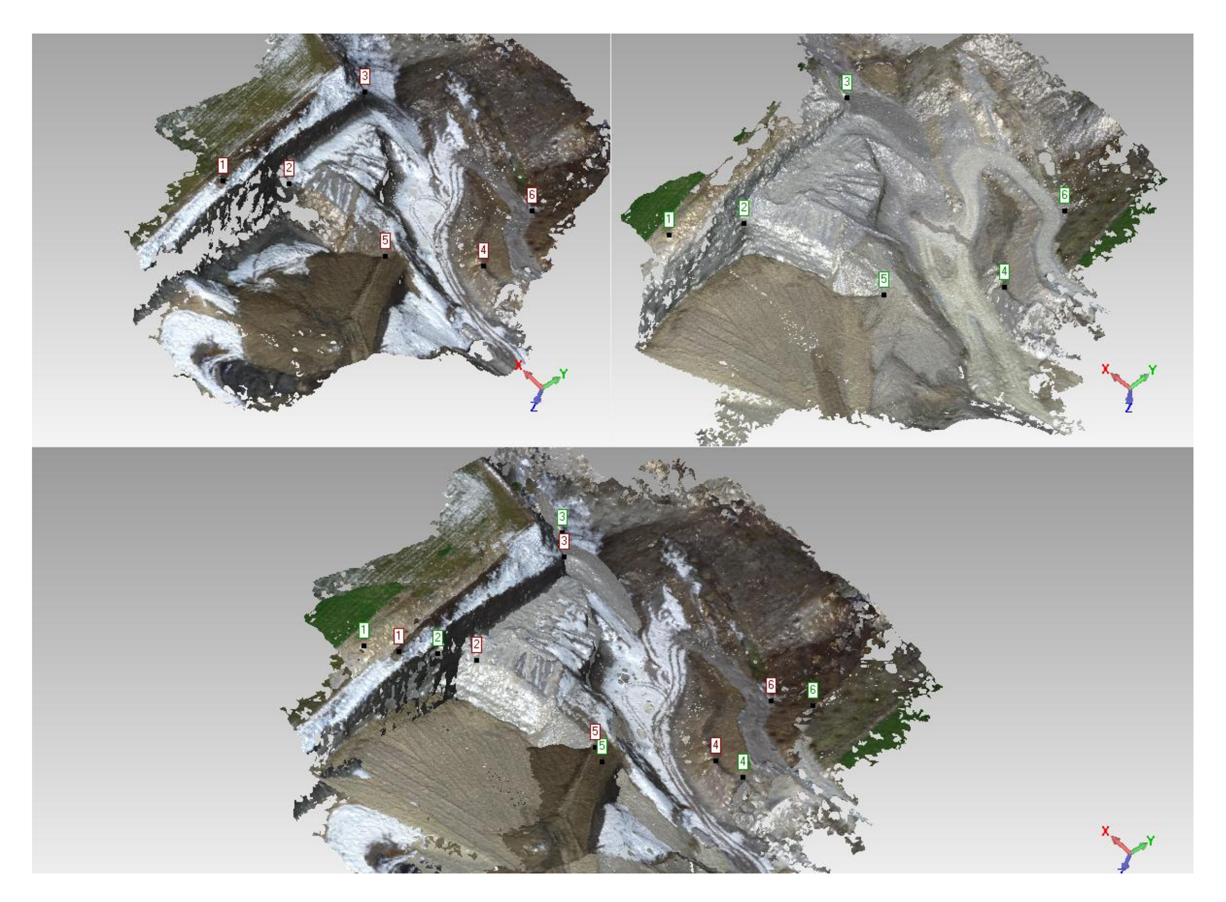


Abbildung 67: Fehlversuch der Registrierung zweier Punktwolken mit unterschiedlichen Massstäben in Geomagic Qualify.

Der Versuch eine Registrierung mit dem Programm Geomagic Qualify durchzuführen, scheiterte ebenso. Grund hierfür ist, dass das Tool zum manuellen Registrieren von Punktwolken, das nach dem ICP-Algorithmus arbeitet (ICP = Iterative Closest Point), nicht bei unterschiedlichen Massstäben der beiden Punktwolken funktioniert. Abbildung 67 zeigt den misslungenen Versuch die beiden Punktwolken mit unterschiedlichen Masstäben in Geomagic Qualify über die manuelle Registrierung in ein Koordinatensystem zu bringen. Linksoben (Photosynth: Kiesgrube_Sommer_00_90_kleinjpg) und rechtsoben (Photosynth: Kiesgrube_Gabba_Winter_116_182) sind die manuell gewählten Passpunkte in der jeweiligen vermaschten Punktwolke dargestellt. Im unteren Bild ist der unterschiedliche Massstab zwischen den beiden System zu erkennen. Die roten Positionen sind gegenüber den grünen Symbolen immer nach innen versetzt. Der Massstab wird bei der Wahl des Initialisierungsbildpaares festgelegt

10 Ergebnisse

Die Analyse der bearbeiteten Datensätze und die im Zuge der Prozessierung gewonnen Einsichten zeigen, dass automatische Techniken der Computer Vision eingebettet in benutzerfreundliche Programme zu sehenswerten Resultaten führen. Die CV Methoden bieten die Möglichkeit in kürzester Zeit dichte 3D-Modelle aus den unterschiedlichsten Bildern zu erstellen. Der hierfür zu betreibende Aufwand des Nutzers ist minimal, da die Prozessierung bis auf die Bildauswahl und die Parametereinstellung selbstständig abläuft. Im Vergleich zur manuellen Bearbeitung teilweise identischer Datensätze, die vom Autor oder von Kommilitonen durchgeführt wurden stellen die Methoden eine riesige Verbesserung dar, was die Zeitersparnis und die Detaillierung der automatischen generierten Punktwolken und vermaschten Modellen betrifft. Hinzu kommt die Tatsache, dass die ansehnlichen Resultate mit frei verfügbarer Software, die teilweise auch den Code beinhaltet, zu erlangen sind. Bei entsprechenden Programmierkenntnissen wäre es sogar möglich, die nach Photosynth ablaufenden Schritte anzupassen, z.B. einen anderen Featurepunktdetektor zu verwenden.

Die Bilder, die im Videomodus der Kamera Panasonic DMC-LX 3 aufgenommen werden, eignen sich für die Rekonstruktion von Objekten in Kombination mit der Photosynth-Software gut. Ist die Kamera an ein UAV montiert um die Aufnahmen zu machen, so sind optimale 3D-Aufnahmekonfigurationen möglich, was ein Vorteil gegenüber der bodengebundenen Nahbereichsphotogrammetrie ist. Auch gegenüber der klassischen Luftbildphotogrammetrie ist die UAV-Photogrammetrie im Vorteil, da sie die Vorzüge der detailreichen Nahbereichsaufnahmen mit den Nützlichkeiten standortunabhängiger Luftbildphotogrammetrie kombiniert. Dies trifft vor allem für UAV-Modelle zu, die im Stande sind uneingeschränkt im dreidimensionalen Raum gelenkt zu werden und hierbei auch auf der Stelle schweben können. Mit solchen UAVs sind Befliegungen durchführbar, in denen ein Objekt umfassend aufgenommen werden kann, unter Einbezug von Kamerapositionen, die eine übergreifende Stabilisierung des Bildverbandes bewirken.

Aufnahmen im Videomodus sind hierfür besonders geeignet, da sie die maximale Anzahl an Bildern des Objektes während eines Fluges erfassen können. Für die Auswertung stehen alle Bilder zur Verfügung, die aber nicht zwangsweise verwendet werden müssen. Zur Vermeidung von schleifenden Schnitten, kann es von Vorteil sein bei der Auswahl der zu verwendenden Bilder einen gewissen Minimalwinkel zwischen zwei Kamerastandpunkten nicht zu unterschreiten.

Für die automatische Auswertbarkeit mit der Photosynth-Toolkit-Methode, wie auch aller anderen automatischer Verfahren des Structure from Motion Ansatzes (Bundler, V3D-SfM[15], SAMANTHA[16]), ist zunächst immer die Textur das beschränkende Medium. In zweiter Linie sind die Kamera- und die Aufnahmekonfiguration entscheidend. Die Photosynth-Toolkit Methode ist für den Benutzer komfortabel, so lange alles funktioniert, weil die richtigen Bilder von ihm eingegeben werden und das Programm diese richtig zusammensetzt. Gibt es aber Probleme in der Prozessierung, die aufgrund manueller Bildmessungen lösbar wären, so hat der Nutzer wenn überhaupt, nur durch Veränderung der Auswahl der beteiligen Bilder die Möglichkeit Einfluss auf die „Auswerteblackbox“ zu nehmen. Eine Kontrolle der aus Photosynth erstellten Kamerapositionen und Featurepunkte anhand von Qualitätswerten der Bündelblockausgleichung existiert nicht. Die durchgeführten

[15] SfM-Software der ETH Zürich, Info: http://www.inf.ethz.ch/personal/chzach/opensource.html, Stand: 27.01.2011

[16] SfM-Projekt der Universität von Verona, Info: http://profs.sci.univr.it/~fusiello/demo/samantha, Stand: 27.01.2011

Kontrollen anhand von Referenzdaten zeigen aber, dass durch Beachtung guter Aufnahmekonfiguration und durch Anbringen von Verzeichnungskorrekturen bedingt brauchbare Modell durch die Methode erstellt werden. Sind keine Referenzdaten vorhanden, so ist eine Kontrolle des Modells auch aufgrund von allgemeinen Methoden möglich, wie Diagonalenvergleich zur Überprüfung der Rechtwinkeligkeit, oder Schnitt- und Ebenheitskontrollen. Belastbare Aussagen zu Punktgenauigkeiten können aber nicht gemacht werden. Noch dazu können Punkte aufgrund ihrer relativen Lage in den Bildern und der Aufnahmekonfiguration unterschiedliche Genauigkeiten aufweisen. Für die Visualisierung einer Befliegung, sei es zu Präsentationszwecken im Rahmen von Architekturwettbewerben oder im Rahmen einer schnellen Erfassung und Darstellung von Situationen, z.B. bei Verkehrsunfällen oder Katastropheneinsätzen, ist die dargestellte Methode aber unbedingt empfehlenswert.

Da alle Schritte mit Programmen, die dem privaten Nutzer keine Kosten verursachen, durchführbar sind, kann die breite Masse von der Anwendung profitieren. Dass die Daten für die Prozessierung ins Internet hochgeladen werden müssen und somit theoretisch für alle sichtbar sind, stellt einen Nachteil der Photosynth-Toolkit Variante dar. Für sensible Bilddaten und kommerzielle Nutzer besteht aber bereits die Möglichkeit, eine Photosynth-Offline Version, namens Geosynth käuflich zu erwerben[17]. Zur Kompatibilität dieses lokal laufenden Programms zu Photosynth Toolkit kann keine Aussage gemacht werden.

Die Verbesserungen in den Modellen auf Grund der Einführung von verzeichnungskorrigierten Bildern zeigen, dass die verwendeten Auswertemethoden von Photosynth nicht unbedingt auf Genauigkeit, sondern eher auf die stabile Prozessierung von Bilddaten ausgelegt ist. Weiter zeigen sie aber auch, dass mit photogrammetrischen Grundsätzen bessere Ergebnisse erzielbar sind. Der interessante Vergleich zwischen der auf Grundlage von verzeichnungskorrigierten Bildern prozessierten dichtgematchten HXE-Punktwolke mit den Scandaten konnte aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden. Ursachen hierfür sind die zu späte Entdeckung der Matlab Calibration Toolbox zur Verzeichnungskorrektur und die Transformation der über 2 Mio. Punkte umfassenden Datei, die die Rechenleistung der Software übersteigt.

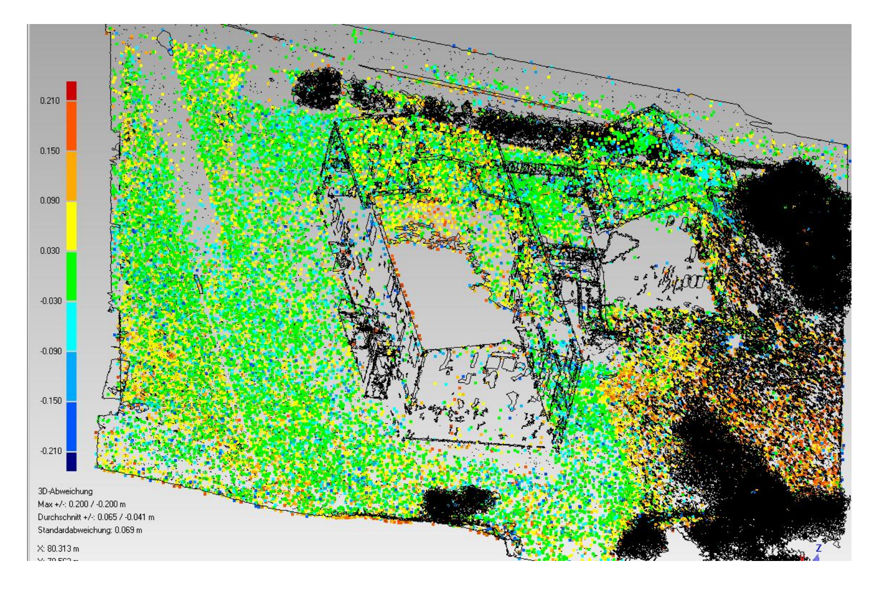


Abbildung 68: Vergleich Photosynth-Punktwolke auf Matlab-Verzeichnungskorrektur basierend mit Laserscan, Einheit [m]

[17] Geosynth ist von Vexcel zu beziehen. Info: www.vexcel.com/geospatial/geosynth/index.asp, Stand 27.01.2011

Eine Transformation zwischen den lokalen Passpunkten und den Passpunkten im Landessystem ist aber vielversprechend. Die Ergebnisse einer 7-Parameter Transformation der auf Matlab-Verzeichnungskorrekturen basierten Punktwolke sind im Anhang in Tabelle 11 und Tabelle 12 aufgeführt. Sie zeigen gegenüber der in 9.1 durchgeführten Transformation Standardabweichungen in den Transformationsparametern, die etwa halb so gross sind. Abbildung 68 zeigt die transformierte Photosynth Punktwolke im Vergleich mit dem Laserscan. Die Photosynth-Punktwolke war mit ihren 70000 Punkten leicht zu transformieren. Grün eingefärbt sind Punkte, die Abweichungen im Bereich von +/- 3 cm gegenüber dem Laserscan-Modell haben. Auch in Bereichen mit Geländeveränderungen sind vorwiegend grüne Punkte vorhanden. Bedenkt man, dass durch Vermaschungsmethoden das vorhandene Rauschen weggelättet werden kann, so scheint die Photosynth-Punktwolke für grossflächige Geländeaufnahmen geeignet. Für den interessanten Gebäudebereich, und hier vor allem den Fassadenflächen, kann wegen zu wenig vorhandenen Featurepunkten leider keine Aussage gemacht werden.

11 Fazit

Für die Photogrammetrie sind die bisherigen Methoden der Computer Vision oft nur bedingt tauglich. Eine möglichst umfassende Rekonstruktion und Darstellung von Objekten scheint in der CV wichtiger, als hohe Genauigkeitsanforderungen an rekonstruierte Objekte, die in der Photogrammetrie höchste Priorität besitzt. In der CV wird versucht Fehler, die im Zuge der automatischen Prozessierung von Bildern passieren, auf Grundlage stochastischer Methoden, wie Ransac zu beheben. Eine Wiederholungsgenauigkeit ist hierdurch nicht gegeben, da dieses Verfahren auf einer zufälligen Auswahl von Prüfdaten basiert. Eine Verbesserung der Featurepunkt- und Matchingmethoden, die zuverlässig Ausreisser eliminiert, würde zu zuverlässigeren Ergebnissen im Matching und somit in der Bündelblockausgleichung führen. Möglichkeiten der Verbesserung bestünden z.B. darin, in die Auswahl der Featurepunkte Geometrieüberlegungen aufgrund von Verzeichnungen und Perspektive einfliessen zu lassen, wahrscheinlich in iterativer Vorgehensweise. Des weiteren wäre es für die Photogrammetrie sinnvoll, Kameraparameter einer Kalibrierung eingeben zu können. Die Autokalibrierung ist nämlich vom Matching abhängig, was aufgrund von Matchingfehlern und uneinheitlichen Bildern zur Berechnung unterschiedlichen Parameter für jedes Bild führt. Mit geeigneten Programmierkenntnissen könnten die Orientierungen von Photosynth und die Bildmessungen von Photosynth Toolkit über Transformationsmatrizen jetzt schon als Näherungswerte bzw. Bildmessungen in einen eigenständig durchzurechnenden Prozess einfliessen. Die Bündelblockausgleichung könnte z.B. mit dem Programm Bingo durchgeführt werden.

Doch auch ohne solche Verbesserungen kann festgestellt werden, dass für Visualisierungen die vorhandenen Methoden bereits ansehnliche Rekonstruktionen der Wirklichkeit zulassen. Recherchen im Internet zeigen diesbezüglich, dass fachfremde Personen aus der Archäologie oder der Biologie, Ausgrabungsstätten oder ganze Flussläufe, aus der Hand oder von UAVs aus photographisch festhalten und daraus 3D-Modelle erstellen. Sie wundern sich hierbei mitunter über den Höhenverlauf ihres Flusses, gehen aber nicht den Schritt weiter, die Ursachen zu ergründen. Dies ist zum einen eine Gefahr für die klassische Vermessung, die hier anscheinend nicht mehr benötigt wird, kann aber auch als Chance aufgefasst werden. Es beweist, dass Fachwissen erforderlich ist, um Projekte auch zu geometrisch richtigen Rekonstruktionen zu führen. Der bestehende Beratungsbedarf ist offensichtlich.

Vergleichende Studien der Computer Vision Techniken[18] zeigen hohe Genauigkeiten und grosse Abdeckung bei Rekonstruktionen aus Bildern. Die in den Studien prozessierten Datensätze basieren allerdings auf genau bestimmten externen und internen Kameraparameter. Die Gründe für die Mängel der im Rahmen dieser Masterarbeit erstellten Modelle müssen also zu grossem Teil auf Seite der Orientierung und Kalibrierung der Bilder in Photosynth liegen. Für das Kalibrierungsproblem wurde eine erste Verbesserungsmöglichkeit durch die Verzeichnungskorrektur mit Matlab gefunden. Das Verbesserungspotential auf der Seite der Orientierung der Bilder wurde bereits oben erörtert. Ob Photosynth in diese Richtung weiterentwickelt wird, ist jedoch zu bezweifeln.

Für zuverlässige, photogrammetrische Auswertungen sollte deshalb auf Produkte zurückgegriffen werden, die einen hybriden Ansatz verfolgen. Zum einen soll der Benutzer in den Prozess eingreifen können um z.B. Bilder manuell vorzuorientieren oder Kameraparameter einer Kalibrierung einführen

[18] Evaluation zu MVS-Reproduktion, Info: http://vision.middlebury.edu/mview/, Stand: 27.01.2011

zu können. Zum anderen sollen Verfahren der automatischen Bildmessung und des Dense-Matching zu genauen und dichten Modellen führen. Dies sollte auf möglichst schnelle, einfache Art und Weise erfolgen. Die Zuverlässigkeit der Auswertung sollte nachvollziehbar und Aussagen zur Genauigkeit möglich sein. Die Software PhotoModeler Scanner[19] scheint nach Recherchen ein Produkt zu sein, dass die neuen Techniken der CV mit den bewährten Grundlagen der Photogrammetrie verbindet. Orientierungen können manuell, oder bei vorhandenen codierten Targets automatisch durchgeführt werden, die Kameraparameter werden hierbei berücksichtigt. Das Dense-Matching basiert auf einem Vergleich von Patches und erinnert in der Produktbeschreibung an PMVS.

[19] Eos Systems Inc, Info: http://www.photomodeler.com/products/pm-scanner.htm, Stand: 27.01.2011

12 Ausblick

Um die aufgrund der Matlab-Verzeichnungskorrektur verbesserte Photosynth-Toolkit-Methode geometrisch noch besser beurteilen zu können, sollte die vollständige Transformation der HXE-MPA-Matlab-Punktwolke unbedingt erfolgen und anschliessend ein erneuter Vergleich mit dem Laserscanmodell durchgeführt werden.

Verbesserungen im Bereich für die Transformation, speziell den Koordinatenabgriff, wären auf Seite der Targets möglich. Hierfür sollten Untersuchungen durchgeführt werden, die unterschiedliche Arten von Mustern und Targets umfassen. Auch 3D-Targets, ähnlich den Verknüpfungskugeln beim terrestrischen Laserscanning sollten in die Evaluation aufgenommen werden.

Falls nur die Masstäblichkeit der Punktwolke von Interesse ist, sollten Versuche zur Abbildung von Referenzmassstäben oder Referenzobjekten unternommen werden.

Im Bereich des Dense-Matching sollte die Möglichkeit der Bildmaskierung überprüft werden. Punktfehler aufgrund von falschem Matching und fehlerhaftem Region Growing zwischen Objekt und Hintergrund, könnten durch die Ausblendung nicht zu rekonstruierender Bildbereiche, mittels der Bildmasken, verhindert werden.

Weitere Studien für die Eignung der Photosynth-Toolkit Methode in anderen Gebieten, z.B für die Immobilienbranche zur einfachen Erstellung von Grundrissen für Objektexposés, oder für die Dokumentation von Routen in Klettergärten, z.B. in Verknüpfung mit einem Web-GIS, könnten folgen.

Auf weite Sicht kann vermutet werden, dass mit Methoden, wie sie in dieser Arbeit präsentiert werden und der stetig ansteigenden Nutzung und Verfügbarkeit von Kameras, Computern und Internet, in allen Formen und Bereichen, auch 3D-Modelle immer alltäglicher werden.

Internetshopping wird dann nicht mehr auf der Bestellung von Standardgrössen basieren, sondern man kann eine photogrammetrisch selbsterstellte, digitale Kopie seines Körpers der Bestellung beifügen. In der Post findet sich kurze Zeit später ein massgeschneidertes Kleidungsstück, individuell angefertigte Schuhe oder ein Schokohase als 1:10-Kopie der eigenen Person. Die Fertigungsprozesse werden natürlich vollautomatisch ablaufen, dank digitaler Reproduktionstechniken wie 3D-Plotter, CNC-Fräsmaschinen oder digitaler Web-und Strickroboter.

Durch Webservices wie Photosynth werden 3D-Stadtmodelle nicht mehr nur aufgrund von jährlichen Befliegungen oder Mobile-Mapping-Fahrten erstellt und aktualisiert werden, sondern tagesaktuelle virtuelle Kopien darstellen, basierend auf den Bildern der Nutzer.

Im Vermessungsbereich wird Feldarbeit zur Erfassung von Grundlagendaten für die Planung durch die Eingabe der gewünschten Parzellennummer erledigt sein. Ein UAV, wird daraufhin selbstständig in den geregelten Flugverkehr eintreten um das gewünschte Gelände zu befliegen. Die Daten zur Prozessierung, wenn nicht gar das fertige 3D-Modell, werden in Echtzeit ins Büro gesendet.

13 Plagiatserklärung

Ich erkläre mit meiner Unterschrift, das Merkblatt Plagiat zur Kenntnis genommen, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die im betroffenen Fachgebiet üblichen Zitiervorschriften eingehalten zu haben.

Merkblatt Plagiat: http://www.ethz.ch/faculty/education/plagiarism_l_de.pdf

______________________ ____________________________________

Ort, Datum Unterschrift

14 Literaturverzeichnis

Cygwin - Wikipedia. (10. 11. 2010). Abgerufen am 4. 1. 2011 von http://de.wikipedia.org/wiki/Cygwin

Astre, H. (22. 8. 2010). *Visual Experiments*. Abgerufen am 4. 12. 2010 von http://www.visual-experiments.com/2010/08/22/dense-point-cloud-created-with-photosyth-and-pmvs2/

Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C., & Taubin, G. (10. 1999). *The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction.* Yorktown: IBM T. J. Watson Research Center.

Brown, D. C. (1966). Decentering Distortion of Lenses. *Photogrammetric Engineering, 32(3)*, S. 444-462.

Craig, N. M. (23. 2. 2010). *Analytical Cartography and Geographic Information System Lab at the Pennsylvania State University*. Abgerufen am 4. 12. 2010 von http://www.personal.psu.edu/nmc15/blogs/anthspace/2010/02/structure-from-motion-point-clouds-to-real-world-coordinates.html

Eisenbeiss, H. (2009). *UAV Photogrammetry (Dissertation).* Zürich: ETH Zürich.

Flury, G. (2009). *Volumenabschätzung eines Kiesabbau - und Deponiegebietes mittels UAV-Bilddaten.* Zürich: IGP, ETH Zürich.

Friedli, E. (2010). *Evaluation des Oktokopters Falcon 8 (Bachelorarbeit).* Zürich: Geometh, ETH Zürich.

Furukawa, Y. (2007). *Documentation of Patch-Based Multi-View Stereo Software (PMVS).* Washington: Universität Washington.

Furukawa, Y. (14. 6. 2010). Patch-based MVS and its Applications. *3D Shape Reconstruction from Pictures (3-teilige Präsentation)*. CVPR 2010, San Francisco.

Furukawa, Y. (13. 7. 2010). *PMVS-Documentation*. Abgerufen am 12. 12. 2010 von http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/documentation.html

Garmin. (Dezember 2009). *Oregon450_DEBenutzerhandbuch.pdf.* Abgerufen am 24. 11 2010 von http://www8.garmin.com/manuals/Oregon450_DEBenutzerhandbuch.pdf

Heider, D. (2006). *Drohnen im zivilen und militärischen Einsatz (Artikel).* Münster: Universität Münster.

Kazhdan, M., Bolitho, M., & Hoppe, H. (2006). *Poisson Surface Reconstruction.* The Eurographics Association.

Kien, D. T., Worring, M., & Dorst, L. (2009). *SIFT Drift: The Perspective Error in Blob Detectors.* Amsterdam: University of Amsterdam.

Knabl, T. (2009). *Generierung und Genauigkeitsuntersuchung von 3DPunktwolken aus Bildsequenzen (Masterprojektarbeit).* Zürich: IGP, ETH Zürich.

Loukaris, M. I., & Argyros, A. A. (März 2009). *SBA: A Software Package for Generic Sparse Bundle Adjustment.* New York: ACM.

Lowe, D. G. (2004). *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints.* Vancouver: CSD, University of British Columbia.

Luhmann, T. (2003). Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 2. überarbeitete Auflage. Wichmann Verlag.

MeshLab. (kein Datum). Abgerufen am 26. 01. 2011 von http://meshlab.sourceforge.net/

Ober, C. (2010). *Orientierung und Kombination UAV-gewonnener Bilddaten am Beispiel des Oktokopters Falcon 8 (Masterprojektarbeit).* Zürich: IGP, ETH Zürich.

Photosynth Microsoft. (kein Datum). *Photosynth Guide v8.* Abgerufen am 5. 1. 2011 von http://mslabs-777.vo.llnwd.net/e1/documentation/Photosynth%20Guide%20v8.pdf

Püschel, H., Sauerbier, M., & Eisenbeiss, H. (2008). A 3D model of Castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, Vol. XXXVII. Part B8*, S. 93-98.

Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2006). Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D. (A. Press, Hrsg.) *Siggraph ´06: ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, S. 835-846.

Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, S. 189-210.

Standardization Commitee. (2010). *CIPA DC-008-2010: Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.3.* Tokio: Camera & Imaging Product Association.

Szelinski, R. (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications.* Springer.

Visual Computing Laboratory. (kein Datum). *MeshLab*. Abgerufen am 5. 1. 2011 von http://meshlab.sourceforge.net/

15 Anhang

15.1 Tabellen

Motorregelung	Frames	Delta T	Umdrehung U	U/T	U/T	Radius	Umfang	Drehgeschwindigkeit	Pixelschweif	Pixelbogen	Belichtung	Belichtung
		[s]		[1/s]	[1/min]	[m]	[m]	[m/s]	[Grad]	[m]	[s]	[1/s]
G1000	472	16,700	34	2,036	122,156	0,050	0,314	0,640	20	0,017	0,027	36,647
G3000	177	5,900	36	6,102	366,102	0,050	0,314	1,917	52,5	0,046	0,024	41,840

Tabelle 8: Auswertung Belichtungstest

Tag Name	Field Name	Tag ID		Type	Count
		Dec	Hex		
A. Tags Relating to GPS					
GPS tag version	GPSVersionID	0	0	BYTE	4
North or South Latitude	GPSLatitudeRef	1	1	ASCII	2
Latitude	GPSLatitude	2	2	RATIONAL	3
East or West Longitude	GPSLongitudeRef	3	3	ASCII	2
Longitude	GPSLongitude	4	4	RATIONAL	3
Altitude reference	GPSAltitudeRef	5	5	BYTE	1
Altitude	GPSAltitude	6	6	RATIONAL	1
GPS time (atomic clock)	GPSTimeStamp	7	7	RATIONAL	3
GPS satellites used for measurement	GPSSatellites	8	8	ASCII	Any
GPS receiver status	GPSStatus	9	9	ASCII	2
GPS measurement mode	GPSMeasureMode	10	A	ASCII	2
Measurement precision	GPSDOP	11	B	RATIONAL	1
Speed unit	GPSSpeedRef	12	C	ASCII	2
Speed of GPS receiver	GPSSpeed	13	D	RATIONAL	1
Reference for direction of movement	GPSTrackRef	14	E	ASCII	2
Direction of movement	GPSTrack	15	F	RATIONAL	1
Reference for direction of image	GPSImgDirectionRef	16	10	ASCII	2
Direction of image	GPSImgDirection	17	11	RATIONAL	1
Geodetic survey data used	GPSMapDatum	18	12	ASCII	Any
Reference for latitude of destination	GPSDestLatitudeRef	19	13	ASCII	2
Latitude of destination	GPSDestLatitude	20	14	RATIONAL	3
Reference for longitude of destination	GPSDestLongitudeRef	21	15	ASCII	2
Longitude of destination	GPSDestLongitude	22	16	RATIONAL	3
Reference for bearing of destination	GPSDestBearingRef	23	17	ASCII	2
Bearing of destination	GPSDestBearing	24	18	RATIONAL	1
Reference for distance to destination	GPSDestDistanceRef	25	19	ASCII	2
Distance to destination	GPSDestDistance	26	1A	RATIONAL	1
Name of GPS processing method	GPSProcessingMethod	27	1B	UNDEFINED	Any
Name of GPS area	GPSAreaInformation	28	1C	UNDEFINED	Any
GPS date	GPSDateStamp	29	1D	ASCII	11
GPS differential correction	GPSDifferential	30	1E	SHORT	1

Tabelle 9: GPS-Informationen in Exif-File, Standard 2.2 (Quelle: www.exif.org/Exif2-2.PDF)

Bild	f	k1	k2	Bild	f	k1	k2
4	0,764586	0,001196	-0,001202	4	0,730037	-0,002285	0,002263
5	0,761799	-0,000157	0,000156	5	0,728893	-0,003383	0,003352
6	0,761405	0,001618	-0,001633	6	0,728220	-0,003446	0,003416
7	0,759260	-0,000224	0,000225	7	0,730254	-0,002415	0,002436
8	0,760407	0,001762	-0,001779	8	0,727957	-0,002881	0,002840
9	0,761239	0,002741	-0,002747	9	0,729324	-0,001488	0,001461
10	0,759640	0,003180	-0,003232	10	0,727220	-0,002534	0,002530
11	0,757897	0,000788	-0,000793	11	0,729146	-0,001275	0,001260
12	0,763126	0,002690	-0,002679	12	0,729005	-0,002345	0,002336
13	0,763159	0,002534	-0,002542	13	0,730182	-0,000820	0,000819
14	0,765477	0,003529	-0,003532	14	0,728835	-0,000017	0,000045
15	0,765818	0,004409	-0,004427	15	0,725710	-0,001111	0,001093
16	0,765681	0,002880	-0,002923	16	0,723142	-0,001802	0,001825
17	0,765937	0,002454	-0,002457	17	0,723122	-0,001634	0,001597
18	0,764857	0,002129	-0,002146	18	0,722216	-0,001885	0,001877
19	0,761251	0,001756	-0,001761	19	0,724597	0,000185	-0,000194
20	0,758966	0,000975	-0,000979	20	0,724202	-0,000769	0,000759
21	0,757570	-0,001788	0,001802	21	0,722442	-0,001715	0,001716
22	0,760642	-0,002277	0,002281	22	0,728195	0,000082	-0,000101
23	0,755804	-0,005982	0,005987	23	0,721081	-0,002748	0,002689
24	0,754086	-0,007397	0,007486	24	0,718535	-0,002442	0,002426
25	0,755942	-0,005137	0,005108	25	0,721388	-0,000828	0,000815
26	0,754626	-0,006752	0,006713	26	0,720341	-0,002338	0,002322
Mittel	0,760834	0,000214	-0,000221	**Mittel**	0,725828	-0,001734	0,001721
St.abw.	0,003684	0,003462	0,003473	**St.abw.**	0,003659	0,001041	0,001033

Tabelle 10: Kameraparameter aus Photosynthprojekten, li .auf Originalbildern, re. auf verzeichnungskorrigierten Bildern beruhend

Punktnum...	Rechts Y [m]	Hoch X [m]	Höhe H [m]	σ_Y [m]	σ_X [m]	σ_H [m]	∇_Y [m]	∇_X [m]	∇_H [m]
0	680563.657...	251312.331...	522.306...	0.008...	0.008...	0.010...	-0.004...	0.015...	-0.020...
2	680580.733...	251280.682...	527.236...	0.005...	0.005...	0.005...	0.025...	-0.014...	0.008...
1	680584.613...	251281.520...	526.542...	0.005...	0.005...	0.005...	-0.016...	-0.001...	-0.010...
4	680559.074...	251266.792...	522.125...	0.006...	0.006...	0.007...	0.002...	0.035...	-0.011...
5	680575.131...	251265.008...	522.602...	0.005...	0.005...	0.006...	0.006...	0.000...	-0.012...
6	680578.955...	251266.553...	522.628...	0.005...	0.005...	0.006...	0.007...	0.003...	0.010...
7	680596.064...	251261.367...	522.784...	0.006...	0.006...	0.008...	0.001...	-0.023...	0.019...
GETPS21	680612.766...	251277.172...	523.765...	0.007...	0.007...	0.009...	0.020...	-0.004...	0.002...
STPS23	680603.575...	251285.019...	522.454...	0.006...	0.006...	0.007...	0.050...	0.008...	0.017...
STPS514	680596.882...	251278.664...	522.846...	0.005...	0.005...	0.006...	0.012...	-0.028...	-0.021...
8	680573.331...	251299.998...	527.227...	0.006...	0.006...	0.007...	-0.013...	0.000...	0.015...
9	680535.178...	251239.908...	521.916...	0.011...	0.011...	0.015...	0.007...	0.070...	0.013...
10	680593.945...	251278.146...	526.654...	0.005...	0.005...	0.006...	-0.013...	0.004...	-0.016...
11	680594.077...	251310.916...	523.510...	0.007...	0.007...	0.009...	-0.019...	-0.019...	-0.001...
KETPS532	680554.481...	251316.526...	522.239...	0.009...	0.009...	0.012...	-0.075...	-0.027...	0.018...

Tabelle 11: vorläufige Ergebnisse der 7-Parametertransformation auf Matlab-Verzeichnungskorrektur basierend

	Transformationsparameter	Standardabweichung σ_{par}	Signifikant
M	35.0870576469	0.0061868814	✓
R_x	1.5330599300	0.0026263417	✓
R_y	4.8029461121	0.0002626751	✓
R_z	1.1123761862	0.0026195817	✓
T_x	251277.6254711625	0.0108564619	✓
T_y	680573.2135094252	0.0110204383	✓
T_z	562.0488504267	0.0086445306	✓

Tabelle 12: Parameter der ungewichteten 7-Parameter-Transformation auf Matlab- Verzeichnungskorrektur basierend

15.2 Datensätze

Folgende Tabelle 13 zeigt die in der Arbeit beschriebenen Datensätze mit ihren Photosynth Namen (Spalte 1), unter denen sie auf der Webseite von Photosynth (Verlinkung in PDF) zu finden sind, sowie je nach Wichtigkeit und Speicherkapazität auch auf der Anlagen-CD. Eine kurze Beschreibung der Aufnahme und Kamera wird in Spalte 2 gegeben. Spalte 3 nennt die Anzahl verwendeter Bilder und ihre Auflösung und ob die Bilder verzeichnungskorrigiert wurden. Spalte 3 gibt die Punktwolkengrösse von Photosynth (PS) und Photosynth Toolkit (PST) an, inkl. der verwendeten PMVS-Parameter. Spalte 4 nennt Stichwörter, die die Art der Objekte, Verwendungsgebiete und Besonderheiten betreffen

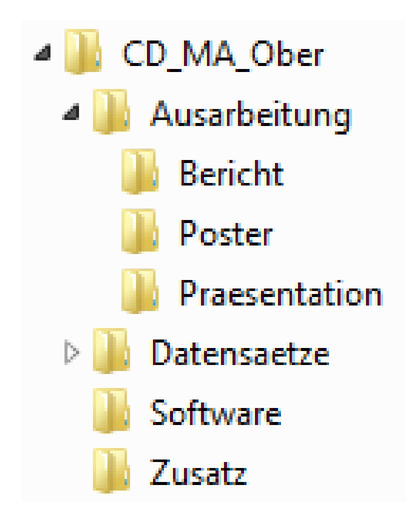
Datensatz	**Grundlage** **Konfiguration** **Kamera**	**Anzahl Bilder** **Pixelzahl**	**PS Punktanzahl** **PST: Punktanzahl** **(Parameter: Level, Threshold, Cellsize, Windowsize)**	**Bemerkung**
Christoph2_0bis155	Video, Handaufnahme 2 konzentrische Kreise Panasonic Lumix DMC, LX 3	156 640x480	PS: 19693 PST:81148 (L1,T0.7,C2,W7) PST:923078 (LO,T0.7,C1,W7)	Innenraum Personenrekon-struktion Forensik
Copan	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Blockbefliegung NIKON D2Xs	22 2848x4288	PS: 54162 PST:412924 (L2,T0.7,C2,W7)	Archäologie
Duebendorf_058_091	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Blockbefliegung Panasonic Lumix DMC, LX 3	34 3648x2736	PS: 52061 PST:2035638 (L2,T0.7,C1,W7)	Flughafen Geländemodell Lageplan Werksgelände
Duebendorf_undistort	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Blockbefliegung Panasonic Lumix DMC, LX 3	34 3648x2736 PS_verzeichnungskorrigiert	PS: 53073 PST:2116860 (L2,T0.7,C1,W7)	Flughafen Geländemodell Lageplan Werksgelände
Duebendorf_58_91_Matlab	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Blockbefliegung Panasonic Lumix DMC, LX 3	34 3648x2736 Matlab verzeichnungskorrigiert	PS: 51534 PST:2518699 (L2,T0.7,C1,W7)	Flughafen Geländemodell Lageplan Werksgelände

Architekten_Haeuschen_444_544	Videobefliegung, UAV 2 Streifen (vor, zurück), Nadir u. schräg Panasonic Lumix DMC, LX 3	101 640x480	PS: 21944 PST:153793 (L0,T0.7,C2,W7) PST:745635 (L0,T0.8,C1,W10)	Einzelgebäude, Privatgrundstück, Vegetationsstudie Lageplan
HXE_Flug_4_70u114_207	Videobefliegung, UAV Nadir, Fassadenschräg Panasonic Lumix DMC, LX 3	161 640x480	PS: 30647 PST:225103 (L0,T0.7,C2,W7)	Einzelgebäude, Visualisierung
HXE_Flug0511_0004bis0026	Videobefliegung, UAV Fassadenschräg, parallele Basis Panasonic Lumix DMC, LX 3	24 640x480	PS: 4828 PST:65213 (L0,/0.7,C2,W7)	Geometrie konvex
Flug_0511_0004_0026_Matlab	Videobefliegung, UAV Fassadenschräg, parallele Basis Panasonic Lumix DMC, LX 3	24 640x480 Matlab verzeichnungskorrigiert	PS:3626 PST:369934 (L0,/0.7,C2,W7)	Dachaufmass, Visualisierung geradlinig
HXE_MPA_816_847_div_Schraeg	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Nadir- u. Schrägaufnahmen Panasonic Lumix DMC, LX 3	49 3648x2736	PS: PST:977336 (L1,T0.7,C2,W7,) PST:2320984 (L1,T0.7,C2,W10,)	Lageplan Geländeaufmass Gebäudevolumen Dachaufmass, Visualisierung, Dokumentation
HXE_MPA_Matlab	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Nadir- u. Schrägaufnahmen Panasonic Lumix DMC, LX 3	49 3648x2736 Matlab verzeichnungskorrigiert	PS:69977 PST:2058203 (L1,T0.7,C2,W7,) PST:2320984 (L1,T0.7,C2,W10,)	Lageplan Geländeaufmass Gebäudevolumen Dachaufmass Visualisierung Dokumentation
Kermit_ori_ohne_4_6 Kermit_Bundler	Niedrig aufgelöste Einzelbilder (640x480 Px) Objekt immer Zentrisch Canon Powershot A10	9 640x480	PS:657 PST:39540 Bundler:628 PMVS:36718 (L0,T0.7,C2,W7)	Testdaten, Bundler-PST-Vergleich
Kiesgrube_Sommer_00_90_kleinjpg	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Nadir- u. Schrägaufnahmen Panasonic Lumix FX35	91 3648x2736	PS: 133819 PST:705396 (L2,T0.7,C2W7) PST:2217666 (L1,T0.7,C2,W7)	Kiesgrube Geländeauf-nahme, Volumen

Kiesgrube_Gabba_Winter_116_182	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Nadir- u. Schrägaufnahmen unterschiedliche Höhen Panasonic Lumix FX35	62 3648x2736	PS:82925 PST: 413342	Kiesgrube, Geländeaufnahme, Volumen Schneeflächen
Krattingen	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Nadir- u. Schrägaufnahmen Panasonic Lumix DMC, LX 3	118 3648x2736	PS: 113986 PST:476107 (L2,T0.7,C2,W7)	Privatgrundstück Einzelgebäude DTM, Lageplan
Landenberg_alle_Heli_verwendet_ohne5Seitenbilder	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Schrägaufnahme, Kreisbefliegung NIKON D2Xs	15 2848x4288	PS:? PST:1317825 (L0,T0.75,C2,W7)	Dachrekonstruktion, Gebäudehöhen, Treppen Geländeaufnahme
Landenberg_Sarnen_undistort	Hochaufgelöste Einzelbilder, UAV Schrägaufnahme, Kreisbefliegung NIKON D2Xs	51 2848x4288 PS_verzeichnungskorrigiert	PS:74043 PST:299408 (L2,t0.8,C2,W7) PST:955810 (L1,T0.8,C2,W8)	Dachrekonstruktion, Gebäudehöhen, Treppen Geländeaufnahme
Physik	Video, Handaufnahme Konfiguration: Parallele Basis Panasonic Lumix DMC, LX 3	7 640x480	PS: 498 PST:9188 (L1,T0.7,C2,W7) PST:118934 (L0,T0.7,C1,W10)	Testdaten diverse, Parameter

Tabelle 13: Übersicht verwendeter Datensätze

Anhang-CD


CD_MA_Ober
Ausarbeitung
Bericht
Poster
Praesentation
Datensaetze
Software
Zusatz